

PROGRAMA

INTERINSTITUCIONAL DE

DOCTORADO EN

ARQUITECTURA



---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES  
UNIVERSIDAD DE COLIMA  
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

---



---

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICÓLAS DE HIDALGO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA



---

Tesis

Para obtener el grado de Doctor en Arquitectura

**Desarrollo y evaluación de morteros de cal,  
integrando arena volcánica y PET reciclado para  
construcciones eficientes y sustentables**

---

Presenta:

**Elena Guadalupe Navarro Mendoza**

Directora de tesis:

**Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**

Codirector:

**Dr. Habid Becerra Santacruz**

Morelia, Michoacán. Julio 2024



PROGRAMA  
INTERINSTITUCIONAL DE  
DOCTORADO EN  
ARQUITECTURA



---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES  
UNIVERSIDAD DE COLIMA  
UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

---



---

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICÓLAS DE HIDALGO  
FACULTAD DE ARQUITECTURA



---

**Desarrollo y evaluación de morteros de cal,  
integrando arena volcánica y PET reciclado para  
construcciones eficientes y sustentables**

---

**MESA SINODAL**

Directora de tesis:

**Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**

Codirectores:

**Dr. Habid Becerra Santacruz  
Dr. Juan Alberto Bedolla Arroyo**

Sinodales:

**Dr. Jorge Armando Ojeda Sánchez  
Dr. Katia Carolina Simancas Yovane**

Morelia, Michoacán. Julio 2024



## **Agradecimientos**

Agradezco profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado a través de sus programas de becas para realizar estudios de maestría.

A mi pareja, Rogelio Javier, por su incondicional apoyo en todo momento.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su inigualable apoyo, confianza e impulso para la realización de esta investigación.

A mis codirectores, Dr. Habid Becerra y Dr. Alberto Bedolla, por su paciencia y generosidad al compartir su conocimiento.

Al equipo del Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, quienes me brindaron su apoyo constante durante toda la investigación.

A mis sinodales, Dr. Jorge Armando Ojeda y Dra. Katia Carolina Simancas, por su paciencia y comprensión con respecto a mi tema de estudio.

A mis amigos, que fueron un gran apoyo durante este proceso formativo.

## Resumen

Esta investigación busca alternativas más eficientes y sostenibles en el diseño de morteros para la construcción, promoviendo la creación de edificaciones sustentables mediante el uso de recursos naturales locales, como la arena volcánica, y materiales reciclados, como el PET, combinados con cal de distintos grados de pureza. Se busca analizar morteros que pueden garantizar la habitabilidad, sustentabilidad, y protección del medio ambiente. Se realizan pruebas de caracterización física, térmica y mecánica de los morteros, evaluando, porosidad, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, conductividad térmica y colorimetría. La comparación con los morteros de cemento también es fundamental para entender las ventajas y limitaciones de los morteros de cal en diferentes aplicaciones constructivas.

El análisis del comportamiento de los morteros de cal, especialmente aquellos con PET como aditivo, revela que estos materiales pueden reducir los costos y el impacto ambiental de la construcción. Además, el estudio aborda la relación entre las propiedades físicas y térmicas de los morteros, subrayando la influencia de la porosidad en la resistencia mecánica y la conductividad térmica. La investigación aporta conocimiento valioso para la selección de materiales, fomentando prácticas constructivas sostenibles y alineadas con principios de eficiencia energética y respeto al medio ambiente.

**Palabras clave:** Morteros de cal, Materiales reciclados, Arena volcánica, PET, caracterización física y térmica.

## Abstract

This research seeks more efficient and sustainable alternatives in the design of mortars for construction, promoting the creation of sustainable buildings through the use of local natural resources, such as volcanic sand, and recycled materials, such as PET, combined with lime of different degrees of purity. The aim is to analyze mortars that can guarantee habitability, sustainability and environmental protection. Tests of physical, thermal and mechanical characterization of the mortars are carried out, evaluating porosity, compressive strength, electrical resistivity, thermal conductivity and colorimetry. Comparison with cement mortars is also fundamental to understand the advantages and limitations of lime mortars in different construction applications.

The analysis of the performance of lime mortars, especially those with PET as an additive, reveals that these materials can reduce the costs and environmental impact of construction. In addition, the study addresses the relationship between the physical and thermal properties of mortars, highlighting the influence of porosity on mechanical strength and thermal conductivity. The research provides valuable knowledge for the selection of materials, promoting sustainable construction practices aligned with principles of energy efficiency and respect for the environment.

**Keywords:** Lime mortars, Recycled materials, Volcanic sand, PET, characterization of the porosity of lime mortars.

## Índice de contenido

Agradecimientos.....	0
Resumen.....	1
Abstract.....	2
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	9
Índice de gráficos.....	12
Capítulo I. Introducción.....	15
Contexto y justificación.....	16
Problema de investigación.....	17
Preguntas de investigación.....	17
Objetivo General.....	18
Objetivos específicos.....	18
Hipótesis.....	19
Capítulo II. Revisión literaria.....	20
Estado del arte.....	21
Morteros de cal.....	22
Propiedades térmicas.....	27
Normas.....	33
Marco de referencia.....	34
Morteros.....	35
Morteros de baja densidad.....	37
Densidad de los materiales.....	38
Propiedades físicas de los materiales.....	41
Resistividad eléctrica, RE.....	41
Velocidad de pulso ultrasónico, VPU.....	42
Resistencia mecánica.....	44
Propiedades térmicas.....	44
Propiedades térmicas de los materiales.....	48
Métodos para determinar las propiedades térmicas.....	50
Colorimetría.....	54

Sostenibilidad .....	55
Capítulo III. Metodología .....	57
Materiales.....	59
Cal .....	59
Cemento de albañilería .....	63
Agregados.....	64
Arena Volcánica .....	64
PET ( tereftalato de polietileno) .....	65
Carbonato de calcio.....	67
Preparación de los especímenes (mezclas) .....	69
Dosificación.....	70
Características de los especímenes .....	72
Especímenes cúbicos.....	73
Especímenes Cilíndricos.....	79
Preparación de muestras para las pruebas de resistividad eléctrica .....	82
Equipos para la caracterización física .....	83
Resistividad eléctrica .....	83
Velocidad de pulso ultrasónico .....	84
Conductividad térmica.....	85
Resistencia a la compresión .....	86
Colorimetría.....	87
Capítulo IV. Resultados .....	89
Resistividad eléctrica, $R_E$ .....	90
Velocidad de pulso ultrasónico, PVU.....	93
Resistencia mecánica.....	95
Conductividad térmica .....	97
Colorimetría .....	97
Capítulo V. Discusión de resultados .....	101
Resistividad eléctrica.....	102
Velocidad de pulso ultrasónico.....	104
Resistencia a la compresión.....	105
Conductividad térmica .....	106

---

Colorimetría .....	108
Capítulo VI. Relación de los resultados .....	110
Relación entre Velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión .....	112
Relación entre la resistividad eléctrica y conductividad térmica.....	114
Relación de la densidad del mortero y la conductividad térmica .....	116
Capitulo VII. Conclusiones .....	118
Referencias bibliográficas .....	122
Anexo I.....	132
Caja caliente construida .....	133
Equipos.....	137
Logger de datos HOBO U12-006.....	137
LOGGER H8-004-02 .....	138
Termostato Digital Control de Temperatura Mh1210w .....	140
HTC2-termómetro .....	141
Tiempo de prueba .....	144
Resultados de los morteros probados en la caja caliente .....	145
Cal de construcción y arena volcánica (CC) .....	146
Cal con contenido de hidróxido de calcio 90% y arena volcánica (CAP90)	150
Cal con contenido de hidróxido de calcio 95% y arena volcánica (CAP95)	155
Cal de construcción con PET (CC-P) .....	160
Cal de construcción- arena volcánica – carbonato de calcio (CC-CC).....	164
Cal de construcción- PET – carbonato de calcio (CC-P-CC) .....	169
Cemento de albañilería – arena volcánica (CA) .....	173
Discusión de resultados .....	178
Conclusiones.....	181
Anexo II.....	182
Análisis climático y bioclimático de la ciudad de Morelia, Michoacán. ....	183
Datos generales de la ciudad .....	183
Análisis de la información climática .....	184
Temperatura .....	184
Humedad.....	186
Precipitaciones.....	189

---

Promedio mensual de lluvia .....	189
Viento .....	190
Análisis bioclimático .....	191
Carta Psicométrica.....	191
Zona de confort .....	192
Requerimientos de climatización.....	193
Conclusión del análisis de clima de Morelia .....	196
Referencias de anexos II .....	196

## Índice de figuras

Figura 1. Morteros como protección de las estructuras. Foto: tomada por el autor. ....	36
Figura 2. Los recubrimientos cubren irregularidades. Foto: tomada por el autor ....	36
Figura 3. Aparato para medir la resistividad eléctrica. Foto: tomada por el autor	42
Figura 4. Medición de la velocidad de pulso ultrasónico.. Foto: Tomada por el autor.....	43
Figura 5. Prueba de resistencia a la compresión. Foto: tomada por el autor.....	44
Figura 6. Esquema del equilibrio térmico. Realizado por el autor .....	45
Figura 7. Transferencia térmica en elementos opacos. Realizado por el autor.....	46
Figura 8. Propiedades térmicas de los materiales y elementos. Realizado por el autor.....	47
Figura 9. Valor de U alto y bajo. Basado en (Blender, 2015) .....	49
Figura 10. Métodos para obtener desempeño térmico de los materiales. Realizado por el autor.....	51
Figura 11. Esquema de principio de los métodos en régimen estacionario. A la izquierda método para espesores medios, a la derecha métodos para pequeños espesores. Basado en (Alvarado Ramírez, 2011) .....	52
Figura 12. Esquema de principio de los métodos de fuente lineal de calor transitorio. Izquierda Método de Hilo caliente con una única sonda, a la derecha el Método de la Aguja térmica. Basado en (Alvarado Ramírez, 2011).....	52
Figura 13. Esquema del aparato. Basado en (Mendoza Arce, et al, 2016) .....	53
Figura 14. Prueba de colorimetría. Foto: tomada por el autor. ....	55
Figura 15. Colorímetro. Foto: tomada por el autor. ....	55
Figura 16. Cal en polvo. Foto: tomada por el autor. ....	60
Figura 17. Ciclo de la cal (Navarro Mendoza E. G., 2019) .....	60
Figura 18. Cemento de albañilería. Foto: tomada por el autor. ....	63
Figura 19. Arena Volcánica. Foto: tomada por el autor.....	65

Figura 20. Finos en la arena volcánica. Foto: tomada por el autor.....	65
Figura 21. Envases de PET. Foto: tomada por el autor. ....	66
Figura 22. Granulometría del PET. Foto: tomada por el autor.....	67
Figura 23. PET triturado. Foto: tomada por el autor. ....	67
Figura 24. Carbonato de calcio en polvo. Foto: tomada por el autor. ....	68
Figura 25. Cal, carbonato de calcio y PET. Foto: tomada por el autor.....	68
Figura 26 Cal y arena volcánica. Foto: tomada por el autor. ....	71
Figura 27. Mezcla en seco de cal, carbonato de calcio y PET.. Foto: tomada por el autor.....	71
Figura 28. Mezcla en seco de cal y arena volcánica. Foto: tomada por el autor..	72
Figura 29. Mezcla de cal y arena volcánica. Foto: tomada por el autor. ....	72
Figura 30. Especímenes en moldes. Foto: tomada por el autor. ....	73
Figura 31. Desmolde de especímenes. Foto: tomada por el autor. ....	73
Figura 32. Mortero de cal de construcción - arena volcánica.....	74
Figura 33. Mortero de cal con contenido de hidróxido de calcio 90 - arena volcánica. ....	74
Figura 34. Mortero de cal con contenido de hidróxido de calcio 95 - arena volcánica. ....	74
Figura 35. Mortero de cal de construcción - arena volcánica - carbonato de calcio. ....	74
Figura 36. Mortero de cal de construcción - PET y cal de construcción - PET - carbonato de calcio.....	74
Figura 37. Mortero de cemento de albañilería. ....	74
Figura 38. Morteros en estado endurecido. Foto: tomada por el autor.....	75
Figura 39. Vista de dimensiones de los cubos de los morteros. Foto: tomada por el autor.....	75
Figura 40. Cilindro de mortero de cal de construcción-arena volcánica. ....	79
Figura 41. Cilindro de mortero de cal alta pureza 90%-arena volcánica. ....	79
Figura 42. Cilindro de mortero de cal alta pureza 95%-arena volcánica ....	79
Figura 43. Cilindro de mortero de cal de construcción-PET. ....	79
Figura 44. Cilindro de mortero de cal de construcción-arena volcánica- carbonato de calcio ....	79
Figura 45. Cilindro de mortero de cal de construcción-PET- carbonato de calcio.	79
Figura 46. Cilindro de mortero de cemento de albañilería-arena volcánica.....	80
Figura 47. Preparado para saturación. Foto: tomada por el autor.....	82
Figura 48. Cubos en saturación. Foto: tomada por el auto .....	82
Figura 49. NILSSON ELECTRICAL LABORATORY INC. . Foto: tomada por el autor. ....	83
Figura 50. Prueba de resistividad eléctrica. Foto: tomada por el autor .....	84
Figura 51 Equipo V-Meter MKIV. Foto: tomada por el autor.....	84
Figura 52. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico. Foto: tomada por el autor. ....	84
Figura 53. Equipo KD2 Pro. Foto: tomada por el autor. ....	85
Figura 54. Prueba de conductividad térmica. Foto: tomada por el autor. ....	85

Figura 55. Variación del equipo KD2 Pro. ....	86
Figura 56. Calibrado del equipo KD2 Pro. Foto: tomada por el autor. ....	86
Figura 57. Resultado de la calibración. Foto: tomada por el autor. ....	86
Figura 58. Prensa eléctrica digital Modelo E659-2. Foto: tomada por el autor. ....	87
Figura 59. Prueba de resistencia a la compresión. Foto: tomada por el autor. ....	87
Figura 60. Espacio de color CIE (Konica Minolta, 2023) ....	88
Figura 61. Valores del color en las muestras. ....	88
Figura 62. Colores de los morteros ....	98
Figura 63. Esquema de colores secuenciales de los morteros. ....	99
Figura 64. Iluminosidad. Realizado por el autor. ....	108
Figura 65. Diferencia de la colorimetría de los morteros. Realizado por el autor. .	109
Figura 66. Materiales empleados, medidas en mm. Realizado por el autor- ....	134
Figura 67. Ejemplo de un aparato calibrado para transferencia de calor horizontal, (ASTM C1363) ....	134
Figura 68. Caja caliente construida. Foto tomada por el autor. ....	135
Figura 69. Esquema de propuesta de caja caliente. Realizado por el autor. ....	135
Figura 70. Tapas para aislar el área. Foto tomada por el autor. ....	136
Figura 71. Logger de datos HOBO U12-006. Foto tomada por el autor. ....	137
Figura 72. Ubicación del Hobo U12-006 en la caja. Foto tomada por el autor. ....	137
Figura 73. LOGGER H8-004-02 Foto tomada por el autor. ....	138
Figura 74. Ubicación de LOGGER H8-004-02. Foto tomada por el autor. ....	139
Figura 75. Ubicación del termopar en el espécimen. Foto tomada por el autor. .	139
Figura 76. Termostato Digital. Foto tomada por el autor. ....	140
Figura 77. Termostato, dimmer y switch. Foto tomada por el autor. ....	140
Figura 78. HTC2-termómetro. Foto tomada por el autor. ....	141
Figura 79. Pasta de alta conductividad. ....	142
Figura 80. Especificaciones de la pasta. ....	142
Figura 81. Panel envolvente. Foto tomada por el autor. ....	142
Figura 82. Panel envolvente con espuma PU. Foto tomada por el autor. ....	142
Figura 83. Termopares en el espécimen. Foto tomada por el autor. ....	143
Figura 84. Probeta cilíndrica de 5 x 10 centímetros. Foto tomada por el autor. ....	144
Figura 85. Ubicación de los sensores de temperatura y claves. Realizado por el autor. ....	145
Figura 86. Morelia, Michoacán México. Google maps. ....	184

## Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de Morteros. (INIFED, 2015).....	35
Tabla 2. Densidad de los materiales usados. Fuente: Fichas técnicas. ....	39
Tabla 3. Áreas superficiales de las cales. (Navarro Mendoza & et al, 2020).....	61
Tabla 4. Caracterización de morteros de cal (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023).....	62
Tabla 5 Fluorescencia de rayos X (XRF). Encontrado en (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023) .....	64
Tabla 6. Partes por millón (ppm) (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023) .....	65
Tabla 7. Claves de los morteros. ....	69
Tabla 8. Dosificación de los morteros. ....	70
Tabla 9. Porcentaje de cementante- agregado.....	70
Tabla 10. Dimensiones de los cubos CC (resultados promedio).....	75
Tabla 11. Dimensiones de los cubos CAP90 (resultados promedio).....	76
Tabla 12. Dimensiones de los cubos CAP95 (resultados promedio).....	76
Tabla 13. Dimensiones de los cubos CC-P (resultados promedio) .....	77
Tabla 14. Dimensiones de los cubos CC-CC (resultados promedio) .....	77
Tabla 15. Dimensiones de los cubos CC-P-CC (resultados promedio) .....	78
Tabla 16. Dimensiones de los cubos CA (resultados promedio) .....	78
Tabla 17. Dimensiones de los cilindros CC (resultados promedio) .....	80
Tabla 18. Dimensiones de los cilindros CAP90 (resultados promedio) .....	80
Tabla 19. Dimensiones de los cilindros CAP95 (resultados promedio) .....	80
Tabla 20. Dimensiones de los cilindros CC-P (resultados promedio).....	81
Tabla 21. Dimensiones de los cilindros CC-CC (resultados promedio) .....	81
Tabla 22. Dimensiones de los cilindros CC-P-CC (resultados promedio).....	81
Tabla 23. Dimensiones de los cilindros CA (resultados promedio).....	81
Tabla 24. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2006) .....	91
Tabla 25. Resistividad eléctrica CC (resultados promedios) .....	91
Tabla 26. Resistividad eléctrica CAP 90 (resultados promedios) .....	91
Tabla 27. Resistividad eléctrica CAP95 (resultados promedios) .....	92
Tabla 28. Resistividad eléctrica CC-P (resultados promedios) .....	92
Tabla 29. Resistividad eléctrica CC-CC (resultados promedios) .....	92
Tabla 30. Resistividad eléctrica CC-P-CC (resultados promedios).....	92
Tabla 31. Resistividad eléctrica CA. (resultados promedios).....	93
Tabla 32. Velocidad de pulso Ultrasónico de CC.....	93
Tabla 33. Velocidad de pulso Ultrasónico de CAP 90.....	93
Tabla 34. Velocidad de pulso Ultrasónico de CAP95.....	94
Tabla 35. Velocidad de pulso Ultrasónico de CC-CC.....	94
Tabla 36. Velocidad de pulso Ultrasónico de CA. ....	94
Tabla 37. Resistencia a la compresión de CC.....	95

Tabla 38. Resistencia a la compresión de CAP 90.....	95
Tabla 39. Resistencia a la compresión de CAP95.....	95
Tabla 40. Resistencia a la compresión de CC-P. ....	96
Tabla 41. Resistencia a la compresión de CC-CC.....	96
Tabla 42. Resistencia a la compresión de CC-P-CC. ....	96
Tabla 43. Resistencia a la compresión de CA. ....	96
Tabla 44. Conductividad térmica de los morteros. ....	97
Tabla 45. Colorimetría de los morteros .....	98
Tabla 46. Resultados de la resistividad eléctrica de los morteros.....	103
Tabla 47 . Resultados de la Velocidad de pulso ultrasónico.....	104
Tabla 48. Resultados de resistencia a la compresión.....	105
Tabla 49. Resultados conductividad térmica.....	107
Tabla 50. Relación entre Velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión .....	113
Tabla 51. Relación entre la resistividad eléctrica y conductividad térmica.....	114
Tabla 52. Relación de la densidad del mortero y la conductividad térmica .....	116
Tabla 53 . Resumen de resultados. ....	119
Tabla 54. Esquema de propuesta de caja caliente.....	145
Tabla 55. Resultados CC I promedios por seis horas con fuente de calor.....	146
Tabla 56. Amortiguamiento térmico CC I. ....	147
Tabla 57. Resultados CC II promedios por seis horas con fuente de calor. ....	147
Tabla 58. Amortiguamiento térmico CC II.....	149
Tabla 59. Resultados CC III promedios por seis horas con fuente de calor. ....	149
Tabla 60. Amortiguamiento térmico CC III.....	150
Tabla 61. Resultados CAP 90 I promedios por seis horas con fuente de calor. ....	151
Tabla 62. Amortiguamiento térmico CAP90 I. ....	152
Tabla 63. Resultados CAP 90 II promedios por seis horas con fuente de calor .....	152
Tabla 64. Amortiguamiento térmico CAP90 II.....	153
Tabla 65. Resultados CAP 90 III promedios por seis horas con fuente de calor. ....	154
Tabla 66. Amortiguamiento térmico CAP90 III.....	155
Tabla 67. Resultados CAP 95 I promedios por seis horas con fuente de calor. ....	155
Tabla 68. Amortiguamiento térmico CAP95 I. ....	156
Tabla 69. Resultados CAP 95 II promedios por seis horas con fuente de calor. ....	157
Tabla 70. Amortiguamiento térmico CAP95 II.....	158
Tabla 71. Resultados CAP 95 III promedios por seis horas con fuente de calor. ....	158
Tabla 72. Amortiguamiento térmico CAP95 III.....	159
Tabla 73. Resultados CC-P I promedios por seis horas con fuente de calor.....	160
Tabla 74. Amortiguamiento térmico CC-P I. ....	161
Tabla 75. Resultados CC-P II promedios por seis horas con fuente de calor.....	161
Tabla 76. Amortiguamiento térmico CC-P II. ....	162
Tabla 77. Resultados CC-P III promedios por seis horas con fuente de calor. ....	163
Tabla 78. Amortiguamiento térmico CC-P III. ....	164

Tabla 79. Resultados CC-CC I promedios por seis horas con fuente de calor.....	164
Tabla 80. Amortiguamiento térmico CC-CC I. ....	166
Tabla 81. Resultados CC-CC II promedios por seis horas con fuente de calor. ....	166
Tabla 82. Amortiguamiento térmico CC-CC II. ....	167
Tabla 83. Resultados CC-CC III promedios por seis horas con fuente de calor. ....	167
Tabla 84. Amortiguamiento térmico CC-CC III.....	169
Tabla 85. Resultados CC-P-CC I promedios por seis horas con fuente de calor. ..	169
Tabla 86. Amortiguamiento térmico CC-P-CC I.....	170
Tabla 87. Resultados CC-P-CC II promedios por seis horas con fuente de calor...	170
Tabla 88. Amortiguamiento térmico CC-P-CC II. ....	172
Tabla 89. Resultados CC-P-CC III promedios por seis horas con fuente de calor..	172
Tabla 90. Amortiguamiento térmico CC-P-CC III. ....	173
Tabla 91. Resultados CA I promedios por seis horas con fuente de calor. ....	173
Tabla 92. Amortiguamiento térmico CA I.....	175
Tabla 93. Resultados CA II promedios por seis horas con fuente de calor. ....	175
Tabla 94. Amortiguamiento térmico CA II.....	176
Tabla 95. Resultados CA II promedios por seis horas con fuente de calor. ....	176
Tabla 96. Amortiguamiento térmico CA III.....	178
Tabla 97. Tiempo de equilibrio entre las dos caras de los morteros. ....	178
Tabla 98. Promedio de amortiguamiento térmico de los morteros. ....	179
Tabla 99. Conductividad térmica, amortiguamiento térmico y tiempo que tarda en equilibrarse la temperatura en entre dos caras.....	180
Tabla 100. Marcha horaria de temperatura por mes y anual. ....	184
Tabla 101. Humedad relativa en el año. ....	187
Tabla 102. Días de lluvia anual.....	189
Tabla 103. Promedio mensual de lluvia. ....	189
Tabla 104. Velocidad del viento.....	190
Tabla 105. Porcentaje de viento dominante.....	191
Tabla 106. Horas de calor, confort y frío. ....	192
Tabla 107. Requerimientos de climatización (horas) .....	193
Tabla 108. Implementaciones de climatización. ....	195

## Índice de gráficos

Gráfico. 1. Retraso térmico y el amortiguamiento térmico.....	50
Gráfico. 2. Diseño metodológico .....	58
Gráfico. 3. Materiales utilizados en los morteros .....	59
Gráfico. 4. Morteros utilizados .....	69
Gráfico. 5. Colorimetría.....	98
Gráfico. 6. Resistividad eléctrica de los morteros .....	103
Gráfico. 7 . Velocidad de pulso ultrasónico .....	105
Gráfico. 8. Resistencia a la compresión. ....	106
Gráfico. 9. Conductividad térmica.....	107
Gráfico. 10. Relación entre Velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión .....	113
Gráfico. 11. Relación entre la resistividad eléctrica y conductividad térmica.....	115
Gráfico. 12 . Relación de la densidad del mortero y la conductividad térmica...	116
Gráfico. 13. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC I durante las seis horas.....	146
Gráfico. 14. Diferencia de temperaturas CC I. ....	147
Gráfico. 15. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC II durante las seis horas.....	148
Gráfico. 16.Diferencia de temperaturas CCII.....	148
Gráfico. 17. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC III durante las seis horas.....	149
Gráfico. 18. Diferencia de temperaturas CCIII.....	150
Gráfico. 19. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 90 I durante las seis horas.....	151
Gráfico. 20. Diferencia de temperaturas CAP 90 I. ....	152
Gráfico. 21. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 90 II durante las seis horas.....	153
Gráfico. 22. Diferencia de temperaturas CAP 90 II.....	153
Gráfico. 23. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 90 III durante las seis horas.....	154
Gráfico. 24. Diferencia de temperaturas CAP 90 III.....	155
Gráfico. 25. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 95 I durante las seis horas.....	156
Gráfico. 26. Diferencia de temperaturas CAP 95 I. ....	156
Gráfico. 27.Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 95 II durante las seis horas.....	157
Gráfico. 28. Diferencia de temperaturas CAP 95 II.....	158

Gráfico. 29. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 95 III durante las seis horas.....	159
Gráfico. 30. Diferencia de temperaturas CAP 95 III.....	159
Gráfico. 31. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC- P I durante las seis horas.....	160
Gráfico. 32. Diferencia de temperaturas CC-P I.....	161
Gráfico. 33. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC- P II durante las seis horas.....	162
Gráfico. 34. Diferencia de temperaturas CC-P II.....	162
Gráfico. 35. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC- P III durante las seis horas.....	163
Gráfico. 36. Diferencia de temperaturas CC-P III.....	164
Gráfico. 37. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-CC I durante las seis horas.....	165
Gráfico. 38. Diferencia de temperaturas CC-CC I.....	165
Gráfico. 39. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-CC II durante las seis horas.....	166
Gráfico. 40. Diferencia de temperaturas CC-CC II.....	167
Gráfico. 41. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-CC III durante las seis horas.....	168
Gráfico. 42. Diferencia de temperaturas CC-CC III.....	168
Gráfico. 43. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-P-CC I durante las seis horas.....	169
Gráfico. 44. Diferencia de temperaturas CC-P-CC I.....	170
Gráfico. 45. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-P-CC II durante las seis horas.....	171
Gráfico. 46. Diferencia de temperaturas CC-P-CC II.....	171
Gráfico. 47. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-P-CC III durante las seis horas.....	172
Gráfico. 48. Diferencia de temperaturas CC-P-CC III.....	173
Gráfico. 49. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CA I durante las seis horas.....	174
Gráfico. 50. Diferencia de temperaturas CA I.....	174
Gráfico. 51. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CA II durante las seis horas.....	175
Gráfico. 52. Diferencia de temperaturas CA II.....	176
Gráfico. 53. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CA III durante las seis horas.....	177
Gráfico. 54. Diferencia de temperaturas CAP III.....	177
Gráfico. 55. Promedio de amortiguamiento térmico de los morteros.....	179
Gráfico. 56. Relación entre el amortiguamiento térmico y la conductividad térmica.....	180

---

Gráfico. 57. Temperaturas y oscilación térmica. ....	186
Gráfico. 58. Isotherma. ....	186
Gráfico. 59. Temperatura (grados centígrados) humedad anual (porcentaje) ....	188
Gráfico. 60. Isohigras. ....	188
Gráfico. 61. Número de días de lluvia anual .....	189
Gráfico. 62. Promedio mensual de lluvia.....	190
Gráfico. 63. Velocidad del viento (Km/h) Semarnat.....	190
Gráfico. 64. Vientos dominantes. ....	191
Gráfico. 65. Carta psicométrica.....	192
Gráfico. 66. Días de calor, confort y frío.....	193
Gráfico. 67. Porcentaje de requerimiento anual .....	194
Gráfico. 68. Requerimientos de climatización por horas del mes.....	195

## Capitulo I. Introducción

## Contexto y justificación

El objetivo de esta investigación es buscar alternativas más eficientes y sostenibles en el diseño de los morteros utilizados en la construcción, con el fin de promover la creación de edificaciones sustentables. Para lograrlo, se exploran opciones que involucran el uso de recursos naturales locales, como la arena volcánica, y materiales reciclados, como el PET, combinados con cal. Estas mezclas buscan no solo reducir los costos de construcción, sino también minimizar el impacto ambiental.

La investigación se enmarca dentro de la normatividad establecida por el Código de Edificación de la Vivienda, elaborado por el Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI). Este código regula las viviendas de hasta cinco niveles, abarcando diversos niveles socioeconómicos y estados del país. Su objetivo es garantizar la habitabilidad, sustentabilidad, protección del medio ambiente, higiene y salud en las construcciones. Es por ello que resulta fundamental seleccionar materiales de construcción que fomenten la reutilización, el reciclaje y la utilización de recursos locales, teniendo en cuenta también aspectos como el color, la relación costo-beneficio y las propiedades térmicas, físicas y mecánicas de los materiales. Asimismo, se debe considerar su transporte desde su extracción o fabricación hasta el lugar de la obra.

En este sentido, la utilización de la arena volcánica como material local y la incorporación del PET como material reciclado, mezclados con cal de construcción y cal de alta pureza, se presentan como opciones que pueden contribuir a la reducción de costos y del impacto ambiental en la construcción. Para evaluar su idoneidad en distintas aplicaciones, se realizan pruebas de caracterización física, térmica y mecánica de los morteros.

Los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan información valiosa para los constructores, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales y promoviendo la construcción de edificaciones más eficientes y sostenibles. Al aprovechar las propiedades físicas, térmicas y mecánicas de estos morteros, se fomenta el desarrollo de prácticas constructivas que se alinean con los principios de sustentabilidad y respeto al medio ambiente, entre las cuales se encuentran su menor consumo de energía en la producción en comparación al cemento, su capacidad para absorber CO<sub>2</sub> que contribuye con el medio ambiente, su ciclo de vida que puede volver a convertirse en carbonato de calcio y su disponibilidad económica y fácil acceso.

## Problema de investigación

El comportamiento de los morteros de cal en la construcción es escasamente comprendido, especialmente en el caso de la cal de alta pureza ya que estas últimas son menos conocidas en la edificación. Además, la falta de investigación sobre la utilización del PET como aditivo en estos morteros dificulta aún más la comprensión de su desempeño. Actualmente, no existen investigaciones que comparen o relacionen las características físicas, mecánicas y térmicas de estos morteros, lo que crea una brecha en el conocimiento sobre su comportamiento.

Además, al conocer las características específicas de los materiales utilizados en los morteros, se puede determinar su idoneidad para diferentes aplicaciones en sistemas constructivos. Esto permitirá aprovechar al máximo las propiedades de los morteros en función de los requisitos y necesidades específicas de cada proyecto.

Actualmente se buscan nuevas alternativas sostenibles y eficientes en la elaboración de morteros para su uso en la construcción. Los materiales utilizados actualmente pueden tener un alto impacto ambiental debido a su extracción, producción y transporte. Por lo tanto, es crucial explorar nuevas opciones que involucren el uso de materiales reciclados y recursos locales. Estas alternativas no solo pueden reducir los costos de construcción, sino también disminuir el impacto ambiental asociado a la industria de la construcción

El problema de investigación se centra en comprender y aprovechar las capacidades y ventajas de los morteros de cal, incluyendo aquellos que incorporan el PET como sustituto de agregados. Esta investigación busca llenar la brecha de conocimiento existente y explorar alternativas más sostenibles y eficientes en la construcción, utilizando materiales reciclados y recursos locales. Al comprender las características de los morteros, se podrán tomar decisiones informadas para optimizar su uso en diferentes aplicaciones constructivas y reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción (Jaime Ledesma, 2014).

## Preguntas de investigación

### Pregunta general

¿Cómo afectan las diferentes composiciones de los morteros de cal, en términos de agregados locales y residuos plásticos, a sus propiedades física, térmicas y mecánicas en comparación con los morteros de cemento?

### Preguntas específicas

¿Cuáles son las diferencias en densidad, porosidad, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, conductividad térmica y colorimetría entre los morteros elaborados con cal de construcción, cal de alta pureza y cemento de albañilería con agregado de arena volcánica?

¿Cómo influye la adición de arena volcánica, PET y carbonato de calcio en la durabilidad, aislamiento térmico, conductividad eléctrica y resistencia mecánica de los morteros en comparación con el mortero de cemento de albañilería?

¿Qué relaciones existen entre la densidad, porosidad, conductividad térmica y resistencia mecánica en los morteros de cal estudiados?

¿En qué medida los morteros de cal con arena volcánica difieren de los morteros de cemento en términos de propiedades físicas y térmicas, y con ventajas presentan para su uso en la construcción?

### Objetivo General

Caracterizar las propiedades de los morteros de matriz cal, elaborados con agregados locales, residuos sólidos plásticos y cal de distintos grados de pureza, ante sollicitaciones mecánicas y térmicas. Para mejorar la calidad, eficiencia y sostenibilidad de las construcciones en comparación con los morteros de cemento, promoviendo así la innovación en la industria de la construcción.

### Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas de los morteros que incluyen cal de construcción, cal de alta pureza con un contenido de hidróxido de calcio del 90% y 95%, y cemento de albañilería con agregado de arena volcánica. Esto implica evaluar aspectos como la densidad, porosidad, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, conductividad térmica y colorimetría.
- Evaluar la influencia de la adición de arena volcánica, PET y carbonato de calcio en las mezclas de morteros en cuanto a su comportamiento físico y térmico. Se analizarán las propiedades relacionadas con la durabilidad, aislamiento térmico, conductividad eléctrica y resistencia mecánica de los morteros, a fin de determinar cómo estos componentes influyen en su desempeño en comparación con el mortero de cemento de albañilería.

- Establecer una interacción entre las características físicas y térmicas de los distintos morteros estudiados.
- Comparar las propiedades físicas y térmicas de los morteros de cal con arena volcánica con el mortero de cemento que es el más usado en la construcción actual.

## **Hipótesis**

Se plantea que la incorporación de arena volcánica, PET y carbonato de calcio en los morteros de cal mejorará significativamente sus propiedades físicas y térmicas en comparación con los morteros de cemento de albañilería, que serán utilizados como referencia en este estudio. En particular, se espera que estas adiciones aumenten la resistencia mecánica, reduzcan la porosidad, mejoren el aislamiento térmico y optimicen la conductividad térmica de los morteros de cal. Se anticipa que la arena volcánica contribuirá a una mayor homogeneidad y menor porosidad, el PET proporcionará una baja conductividad térmica y el carbonato de calcio mejorará la resistencia mecánica y la calidad del mortero debido a su finura.

La hipótesis sugiere que estas combinaciones específicas de materiales reciclados y locales no solo mejorarán el desempeño físico y térmico de los morteros de cal, sino que también ofrecerán una alternativa más sostenible y eficiente a los morteros de cemento de albañilería, que consisten en una mezcla de cemento de albañilería y arena volcánica. La realización de pruebas detalladas de velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, resistencia a la compresión y conductividad térmica permitirá evaluar y cuantificar los efectos de estas adiciones, proporcionando evidencia empírica para respaldar la hipótesis planteada.

Se espera que los resultados de estas pruebas demuestren que los morteros de cal con las adiciones mencionadas superarán a los morteros de cemento de albañilería en varios aspectos clave, contribuyendo así a una construcción más eficiente, duradera y sostenible. Además, los hallazgos obtenidos serán fundamentales para informar la toma de decisiones en el diseño y selección de mezclas de mortero más adecuadas, promoviendo la innovación en la industria de la construcción y alineándose con los principios de sostenibilidad y respeto al medio ambiente.

## Capítulo II. Revisión literaria

## Estado del arte

Para dar inicio al proyecto, se llevó a cabo una investigación de la literatura existente, que se dividió en tres partes principales, como morteros de cal, propiedades térmicas y normas para abordar los siguientes aspectos:

Se llevó a cabo una investigación sobre los morteros de cal y sus características. Se analizaron diferentes perspectivas desde las cuales se han estudiado estos morteros. Se encontró que los morteros de cal han sido objeto de estudio tanto desde la perspectiva histórica y tradicional, como desde la perspectiva técnica y científica. En el ámbito histórico, se han investigado los métodos de fabricación y uso de los morteros de cal a lo largo del tiempo, considerando su importancia en la arquitectura y el patrimonio cultural.

Desde el enfoque técnico y científico, se han realizado estudios sobre las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los morteros de cal. Se han evaluado aspectos como la resistencia mecánica, la porosidad, la permeabilidad, la adherencia, entre otros. También se ha investigado el efecto de diferentes variables en la calidad y desempeño de los morteros de cal, como la granulometría de los agregados, la relación agua/cemento, entre otros.

Además, se han utilizado diversas técnicas de caracterización y ensayo para evaluar los morteros de cal, como pruebas de resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, colorimetría, entre otras. Estas técnicas permiten obtener información precisa sobre las propiedades y comportamiento de los morteros de cal en diferentes condiciones de uso.

El estudio del estado del arte de los morteros de cal ha revelado la importancia y versatilidad de este material en la construcción. Se han abordado diferentes aspectos de investigación y se han utilizado diversas metodologías para comprender y mejorar las características y desempeño de los morteros de cal.

Métodos para conocer las propiedades térmicas de los materiales: Se analizaron los métodos y técnicas utilizados para medir y evaluar las propiedades térmicas de los materiales, como la conductividad térmica, la resistencia térmica y la capacidad térmica. Se exploraron tanto los métodos en estado estacionario, como el método del flujo de calor, como los métodos en estado transitorio, que permiten evaluar la respuesta térmica de los materiales ante cambios de temperatura.

Análisis de desempeño térmico de materiales de construcción: Se estudiaron los enfoques y modelos utilizados para analizar y simular el desempeño térmico de los materiales de construcción en diferentes condiciones ambientales. Estos análisis

consideran factores como la transferencia de calor, la radiación solar, la convección y otros fenómenos relacionados con el comportamiento térmico de los materiales en la edificación.

En el contexto de los morteros de cal, se investigó cómo las propiedades térmicas de los materiales y elementos, así como los métodos de medición y análisis, pueden ser aplicados para evaluar y mejorar el comportamiento térmico de los sistemas constructivos que utilizan morteros de cal. Esto permite diseñar y construir edificaciones más eficientes desde el punto de vista energético, reduciendo la pérdida o ganancia de calor a través de los elementos constructivos y contribuyendo a la sostenibilidad y confort térmico de los espacios habitables.

El estudio de las propiedades térmicas de los materiales, los métodos de medición y análisis, y el análisis del desempeño térmico de los materiales de construcción proporcionan una base sólida para comprender y mejorar el comportamiento térmico de los morteros de cal y su aplicación en sistemas constructivos eficientes y sostenibles.

### **Morteros de cal**

En el estudio sobre el uso de la cal hidratada seca en inyecciones arquitectónicas, se compararon las influencias de tres tipos de cales hidratadas secas disponibles comercialmente en la trabajabilidad y propiedades mecánicas de las lechadas de inyección. Las principales diferencias entre las cales se encontraron en su composición química y mineralógica, así como en su área específica de Blaine. Las lechadas se componían de cal hidratada seca, relleno de piedra caliza finamente molida, agua y superplastificante. Los resultados revelaron que el área específica de Blaine no está directamente relacionada con las propiedades de las lechadas frescas. La distribución y forma de los granos de cal y sus agregados en la suspensión acuosa son parámetros clave que influyen en las siguientes propiedades de la lechada fresca: fluidez, inyectabilidad, estabilidad de la mezcla y capacidad de retención de agua. Sin embargo, las resistencias mecánicas de las lechadas de inyección de cal fueron mayores en relación con un aumento en el contenido de portlandita y el área específica de Blaine de la cal hidratada seca. Este análisis resalta la complejidad de los factores que afectan las propiedades de las lechadas de cal, subrayando la importancia de considerar no solo la composición química y mineralógica de la cal, sino también la morfología de las partículas en la suspensión. Estos hallazgos tienen implicaciones significativas para la selección y aplicación de cal hidratada seca en inyecciones arquitectónicas, sugiriendo que una comprensión detallada de estos factores puede llevar a la optimización de la formulación de las lechadas para mejorar su desempeño tanto en estado fresco como endurecido. (Padovnik & Bokan-Bosiljkov, 2021)

En las memorias de la 2da Conferencia de Morteros Históricos, específicamente en el texto "The Influence of Calcium Hydroxide on the Plasticity of Lime Putties", se destaca la falta de literatura científica sobre las características de la cal en relación con su plasticidad. En esta investigación, se realizaron pruebas de plasticidad en diferentes tipos de cal y en distintas regiones, y se observó que el tamaño de partícula aumenta a medida que la cal se hidrata durante más tiempo. Además, se encontró que la plasticidad está influenciada por la forma de las partículas. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender cómo la composición y la hidratación de la cal pueden afectar sus propiedades plásticas (Klein, Hogewoning, Schmidt, & Middendorf, 2010).

En el texto "Principios generales para la elaboración de argamasas" se detallan los requisitos y consideraciones para obtener una argamasa de cal de calidad, incluyendo el uso de materiales de sacrificio para proteger la estructura de la influencia ambiental. Se menciona que tanto la cal apagada en obra como la cal en bulto (calhidra) pueden ser utilizadas, pero se recomienda precaución en el almacenamiento para evitar la carbonatación. También se aborda la opción de utilizar cales químicas debido a su finura, sugiriendo hidratarlas y mantenerlas en estado de pasta durante algunas semanas para asegurar sus características particulares (Villaseñor & Schneider, 2013).

En el artículo "Study of the effects of excessive cement or lime in mechanical properties and durability of the mortar coating", se llevaron a cabo pruebas mecánicas y de durabilidad en morteros de revestimiento con un exceso de cemento o cal. Los resultados demostraron que en algunas ocasiones, el exceso de cemento puede mejorar ciertas propiedades mecánicas del mortero, como la resistencia, sin embargo, también se observó una reducción en la durabilidad y adhesión del revestimiento. Esto resalta la importancia de mantener una proporción adecuada de cemento o cal en los morteros para lograr un equilibrio entre las propiedades mecánicas y la durabilidad del revestimiento (Santos W, y otros, 2019).

En la investigación "Ash Substitution Effect in Brick Fabrication in Induration Time and Mechanical Resistance in Mortars Portland Cement Base", se sustituye parte del cemento en los morteros de cemento-arena y pasta de cemento-agua para evaluar la actividad puzolánica de la matriz del cemento (Arreola Sánchez, Alonso Guzmán, Chávez Gracia, Martínez Molina, & Navarrete Seras, 2017).

Para reducir la cantidad de cemento en las mezclas, se lleva a cabo el estudio "Analysis of Carbonation in Mortars made with Solid Waste as a Substitute for Cement" en el cual se reemplaza el cemento con residuos agroindustriales como una alternativa sostenible (Martinez Molina, y otros, 2015).

En la tesis "Aplicación de recubrimiento de mortero en muros de edificaciones" , se busca desarrollar una mezcla de mortero de cemento adecuada para su aplicación en recubrimientos monocapa en muros, considerando su trabajabilidad para aplicarlo con una máquina de proyección conocida como Tirolesa (Zamora Ferrer, 2012).

En el documento "Los agregados de morteros y conglomerantes de cal" se describen las características deseables en los morteros y la importancia de utilizar cal de calidad. También se menciona el aporte de los agregados, como los áridos y los aditivos, en las propiedades y comportamiento de los morteros (Alonso Olvera, 2013).

Uno de los factores que afectan la durabilidad de los morteros son las sales algunas veces llamada salitre, en el estudio *Artificial ageing by salt crystallization: test protocol and salt distribution patterns in lime-based rendering mortars* se propone un protocolo para ver la susceptibilidad de un mortero por la sal y evaluar algunos morteros de cal (Nogueira , Ferreira Pinto, & Gomes, 2020).

En el estudio "Comparative analysis of buildings insulation material properties and performance," se llevó a cabo una evaluación completa de distintos materiales aislantes utilizados en la construcción de edificios. Se analizaron materiales inorgánicos como aislantes fibrosos y celulares, así como orgánicos, incluyendo poliestireno, poliuretano, celulosa, entre otros. También se consideraron materiales de última generación como espumas, aerogel, y nano aislantes. Se evaluaron características como desempeño térmico, propiedades acústicas, capacidad higroscópica, costo, comportamiento ante el fuego y el medio ambiente. El objetivo fue proporcionar información objetiva para la selección de materiales aislantes más adecuados para edificaciones eficientes y sostenibles (Kumar, Alam, Zou, Sanjayan, & Memon, 2020).

En los últimos años, ha habido un creciente interés en el uso de cementantes sustentables. En el artículo titulado "Resistencia a la compresión y reología de cementantes ambientalmente amigables", se lleva a cabo un experimento con diversas combinaciones de aditivos para mejorar la resistencia a la compresión. Los resultados demuestran que las mezclas de cemento Portland y residuos industriales son adecuadas para su aplicación en la construcción (Lizarazo Marriaga & Claisse, 2009).

El análisis de la literatura existente brinda un panorama completo sobre los aspectos relevantes en el desarrollo de morteros, las propiedades térmicas de los materiales y las prácticas en la construcción. Esto permite identificar las lagunas de conocimiento y la necesidad de investigar más a fondo para contribuir al

avance en el campo de los morteros y su aplicabilidad en la construcción sostenible.

Los sistemas constructivos han experimentado una evolución a lo largo del tiempo, y parte de este desarrollo se ha centrado en la industrialización y en la mejora de los materiales utilizados. En el artículo "La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización" (Monjo Carrió, 2005), se aborda la importancia de los sistemas constructivos como parte integral de los procesos de construcción y se hace referencia a la "ciencia de la construcción", que implica la correcta aplicación de los materiales en función de un diseño predeterminado que aproveche al máximo sus propiedades. Por lo tanto, resulta fundamental conocer a fondo los materiales y su desarrollo tecnológico para poder crear nuevos diseños y sistemas constructivos acordes a las necesidades actuales.

En el caso específico de los morteros de cal, se ha buscado mejorar una de sus desventajas inherentes, que es su lenta carbonatación y la necesidad de contacto con el aire. En el artículo "Alkali-dolomite reaction in air lime mortar - implications for increased strength and water resistance" (Stukovnik et al., 2020), se explora el aumento de resistencia y resistencia al agua de los morteros de cal al agregar dolomita, especialmente en ambientes húmedos o expuestos al agua.

Además, se han realizado investigaciones comparativas entre diferentes tipos de cal para analizar el efecto de su envejecimiento en las propiedades mecánicas de los morteros. En el artículo "Age effect on the mechanical properties of natural hydraulic and aerial lime mortars" (Garijo et al., 2020), se realiza una comparación entre la cal aérea y la cal hidráulica, demostrando un aumento en las propiedades mecánicas a partir del día 56.

Los aditivos también han sido utilizados en los morteros de cal para mejorar sus características. En el artículo "Effective Porosity Comparison with a Lime Mortar Matrix Base during 350 to 700 Days" (Velázquez Perez et al., 2017), se analiza cómo los aditivos pueden modificar la matriz de poros en los morteros de cal. Por otro lado, en el artículo "Influence of inorganic and organic additives on spectrophotometry of lime mortars" (Velázquez Pérez et al., 2017), se investiga el efecto de ciertos aditivos en el color de los morteros de cal, especialmente en el contexto de su uso en la restauración de edificios patrimoniales.

En el artículo "Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility" de Tania Santos, se llevaron a cabo pruebas en morteros de tierra para evaluar su desempeño físico y su susceptibilidad a la biodeterioración. Los resultados demostraron que la adición de fibras y cal en los morteros de tierra contribuye a la reducción de la densidad

aparente y el aumento de la porosidad. Además, la incorporación de cal aumenta el pH del mortero, lo que ayuda a prevenir el crecimiento de hongos. Sin embargo, se observó una disminución en la resistencia mecánica de los morteros debido a esta adición (Santos, Nunes, & Faria, 2017).

En el artículo "Evolution of the microstructure of lime-based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates", se investiga la influencia de los agregados en los morteros de cal y se establece una relación entre la porosidad y las propiedades mecánicas (Santos, Veiga, Silva, de Brito, & Álvarez, 2018). El estudio analiza cómo los diferentes tipos de agregados afectan la microestructura de los morteros y cómo esto a su vez influye en su comportamiento mecánico. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la importancia de una selección adecuada de los agregados en la formulación de morteros de cal con características óptimas de resistencia y durabilidad. Estas investigaciones demuestran la importancia de comprender las propiedades y el comportamiento de los morteros de cal, así como la búsqueda constante de soluciones para mejorar su desempeño y adaptarlos a las necesidades específicas de la construcción y la conservación del patrimonio arquitectónico.

En el artículo "Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars" se utilizó el PET como agregado no biodegradable en lugar de los agregados naturales en morteros poliméricos. Se reemplazó el peso de la arena con este material en porcentajes del 5%, 10%, 15% y 20%, y se evaluaron las propiedades mecánicas. Se observó que hubo una disminución en la resistencia a la compresión, pero un aumento en la tenacidad a la flexión (Reis & Carneiro, 2011).

En el artículo "Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime", se llevaron a cabo mezclas de cemento Portland, cal hidratada y PET. Este último fue utilizado como sustituto del agregado fino en diferentes proporciones: 2.5%, 5%, 10%, 15% y 20% en volumen. Los resultados obtenidos demostraron que la incorporación de PET sí afectó las propiedades de los morteros (Spósito, y otros, 2020).

En este estudio, se exploran distintos métodos para medir la conductividad térmica, y uno de ellos es el uso del equipo KD2PRO. El artículo titulado "Medida de la conductividad térmica del suelo en laboratorio. Fundamentos físicos, aplicaciones geotérmicas y relaciones con otros parámetros del suelo" se enfoca en analizar muestras geológicas obtenidas del campus de la Universidad Politécnica de Valencia. Para ello, emplearon tanto el método de aguja simple como el de sonda doble (Nope Gómez & De Santiago, 2014). Los resultados de estas mediciones contribuyen a comprender mejor las propiedades térmicas del suelo y su relevancia en aplicaciones geotérmicas y otras áreas relacionadas.

## Propiedades térmicas

En el artículo "Nivel de masa térmica", define el concepto de masa térmica, también conocida como inercia térmica, que se refiere a la capacidad de un material de almacenar calor y liberarlo gradualmente en respuesta a cambios de temperatura (Ordóñez García, 2021).

En el artículo "Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods", exploran los principales métodos utilizados para determinar la conductividad térmica de materiales aislantes, como el EPS y el aerogel de sílice, en los morteros. Estos métodos incluyen tanto la medición en estado estacionario como en estado transitorio (Glória Gomes, Flores-Colen, da Silva, & Pedroso, 2018).

En el contexto de la transferencia de calor convectiva en superficies exteriores de edificios, este estudio ofrece una revisión de las correlaciones existentes del coeficiente de transferencia de calor convectivo exterior (CHTC) con la velocidad del viento, señalando discrepancias significativas entre ellas. Se evalúa la aplicabilidad de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para obtener correlaciones forzadas de CHTC, utilizando simulaciones estacionarias de Navier-Stokes con modelado de número de Reynolds bajo (LRNM) para mejorar la precisión. Se encuentra que el campo de flujo se vuelve cuasi independiente del número de Reynolds a ciertos valores, lo que permite limitar la velocidad del viento evaluada y, por ende, la resolución de la malla en la región cercana a la pared, reduciendo el costo computacional. Se presenta la distribución de la correlación CHTC-U10 sobre las superficies de barlovento y sotavento, mostrando que estas correlaciones pueden ser determinadas con precisión mediante simulaciones con valores de velocidad del viento relativamente bajos y utilizando solo unos pocos valores discretos de velocidad del viento, lo que limita el número requerido de simulaciones de CFD. (Defraeye, Blocken, & Carmeliet, 2011).

En el ámbito experimental, el artículo "Diseño de una Caja Caliente bajo la norma ASTM C 1363" describe el diseño de un dispositivo experimental para evaluar el comportamiento térmico de puertas y ventanas (Mendoza Arce, Erazo Navarrete, & Mendoza Haro, 2016).

La caracterización térmica de muros se aborda en el estudio "Caracterización térmica de muros y simulación energética de un edificio histórico", donde se utiliza la termografía infrarroja para analizar la temperatura y humedad relativa en fachadas (Del Rincón Maravilla, 2012).

En cuanto a la medición de la conductividad térmica en materiales aislantes, el artículo "Medición de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo

régimen de flujo de calor no estacionario" presenta tres métodos experimentales para determinar las propiedades térmicas de los aislamientos térmicos (Daza-Mafioli, Coral-Escobar, & Plaza-Castillo, 2019).

El estudio "Experimental study of massive wall systems with fins attached on the heated Wall with glazing" investiga la transferencia de calor en paredes con altas unidades a la superficie y vidrios, analizando los mecanismos de convección, radiación y conducción de calor (Bilgen, 2001).

En cuanto a las técnicas de medición de conductividad térmica, el artículo "Sistema de calentamiento escalonado para la medición de la conductividad térmica" (Gutiérrez & Rodríguez, 2019) y "Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida" presentan dispositivos y métodos experimentales para obtener datos precisos sobre la conductividad térmica de materiales de construcción (Mosquera Arancibia, 2013).

Se han realizado simulaciones numéricas en el artículo "Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación", utilizando diferencias finitas para analizar la transferencia de calor en techos y muros (Huelsz, Barrios, Rechtman, & Rojas).

Otros estudios se centran en materiales específicos, como el artículo "Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh", que investiga las propiedades térmicas de morteros reforzados con fibras de palma (Boumhaout, Boukhattem, Hamdi, Benhamou, & Ait Nouh, 2017).

En el artículo "Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas", se realiza un análisis térmico de un edificio de oficinas utilizando simulaciones numéricas (Rodríguez-Muñoz, Nájera-Trejo, & Martín-Domínguez, 2018).

En el campo de la medición experimental de propiedades térmicas, el artículo "Simplified estimation method for the determination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low-cost hot strip" presenta un método para determinar la efusividad térmica y conductividad térmica (Jannot & Meukam, 2004).

La conductividad térmica de hormigones de cáñamo se analiza en el estudio "Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content", que utiliza mediciones experimentales y modelado numérico para

investigar las propiedades térmicas de estos materiales (Collet & Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, 2014).

En relación a la inercia térmica, el estudio "Thermal inertia of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall panels: Experimental study" realiza una investigación experimental a corto plazo sobre la inercia térmica de paneles de pared de hormigón ligero (Soon-Ching, Kaw-Sai, & Ngee-Heng, 2010).

El método de la placa de flujo de calor se utiliza para determinar la conductividad térmica de materiales de construcción en el artículo "Using the heat flow plate method for determining thermal conductivity of buildings materials". Este método consiste en colocar la muestra y un material de referencia en una cámara calorimétrica y aplicar calor desde abajo (Flori, Putan, & Vilceanu, 2017).

El análisis del aislamiento en sistemas de muros se aborda en el estudio "Análisis de aislamiento en tres sistemas de muro, como envolvente alternativo para el desarrollo de la vivienda social", utilizando una combinación de experimentación y simulación para analizar la transmisión de calor en muros de bloque de concreto, panel de yeso y poliestireno de baja densidad (Espinosa-Guerrero, Cordero-Valdéz, Ruíz-Saucedo, & Rouz-Gutiérrez, 2017).

La técnica de termovisión infrarroja se utiliza en el estudio "Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site" para evaluar el valor de transmitancia térmica de elementos de construcción opacos en sitio. Esta técnica no invasiva utiliza la termografía infrarroja para obtener información sobre el comportamiento térmico de los muros (Albatici & Tonelli, 2010).

En cuanto a la medición de la conductividad térmica en adobes y bloques de tierra comprimida, el estudio "Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida" presenta un método experimental que utiliza una aguja térmica y la fuente lineal de calor transitorio para obtener datos precisos sobre la conductividad térmica de estos materiales (Mosquera Arancibia, 2013).

Existen diversos tipos de materiales utilizados en la construcción, entre ellos los bloques que son comúnmente empleados para construir muros. Para conocer las características térmicas de estos bloques, se han realizado diversos estudios, como por ejemplo el titulado "Comportamiento térmico de mampostería de bloques de yeso hidrófugo con variación del espesor de revestimiento". En este estudio, se analizó la influencia del revestimiento cerámico en los bloques

utilizando una metodología que involucra cámaras térmicas e infrarrojas. Los resultados revelaron que el espesor del revestimiento de yeso proporciona ventajas en términos de resistencia térmica, aumento de la capacidad térmica y reducción de la transmitancia térmica en los bloques de mampostería (Arruda Cavalcanti, Bezerra Batista, Viera Póvoas, & Aquini Rocha, 2020).

El estudio titulado "Diseño del sistema de medición de conductividad térmica de materiales para la construcción" proporciona los fundamentos para la medición de la conductividad térmica de materiales aislantes sólidos utilizando el dispositivo de placa caliente con guarda (Lira Cortés, García Duarte, Méndez Lángo, & González Durán, 2010).

En el artículo "Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra", se lleva a cabo una experimentación con el objetivo de analizar las características térmicas y la resistencia mecánica de materiales de suelos naturales estabilizados (Cuitiño-Rosales, Rotondaro, & Esteves, 2020).

En el artículo "The Potential for Light Straw Clay Construction in Japan: An Examination of the Building Method and Thermal Performance", se investiga el uso de una mezcla de paja ligera y arcilla como material de construcción. Se observó que esta combinación ofrece un buen aislamiento térmico. Sin embargo, se identificó que el método de construcción con este material es más lento y, por lo tanto, puede resultar más costoso en comparación con otros métodos constructivos (Holzhueter & Itonaga, 2017).

El texto "Thermal characterization of insulating materials" analiza diversos métodos para calcular la capacidad calorífica de distintos aislantes livianos. Los investigadores proponen un nuevo método para evaluar esta capacidad, buscando mejorar la precisión y eficiencia de las mediciones. Al revisar diferentes técnicas existentes, se pretende proporcionar una evaluación más completa de las propiedades térmicas de estos materiales aislantes. El objetivo es brindar información relevante y útil para el diseño y la selección de aislantes térmicos más eficientes y sostenibles para su aplicación en la construcción de edificios y otras áreas donde el control del calor sea importante (Ricciu, Besalduch, Galatioto, & Ciulla, 2017).

En el estudio titulado "Determinación experimental de la conductividad térmica de materiales aislantes naturales y reciclados", se llevó a cabo una investigación para medir la conductividad térmica de diferentes materiales reciclados utilizando un equipo de geometría cilíndrica. Se analizaron materiales como piedra pómez, paja de cereal de avena, aserrín, papel picado y cartón

corrugado, con el objetivo de evaluar su capacidad de aislamiento térmico a través de la medición de su conductividad térmica (Gutiérrez & González, 2012).

En el ámbito del cemento, se destaca el estudio "Thermo-physical, mechanical and microstructural properties of cementless lightweight mortar", donde se evaluó una mezcla de pasta de humo de sílice y cal como aglutinante, junto con perlita expandida en diferentes proporciones. Los resultados demostraron que este mortero presenta un rendimiento mecánico razonable, mejora la reflectividad y reduce la conductividad térmica. Recomendando su aplicación enlucidos para contribuir a la construcción de edificios más energéticamente eficientes y sustentables (Al-Jabri, Shoukry, Mokhtar, & Morsy, 2019).

Para medir la conductividad térmica de materiales, se emplean diversos métodos. En el artículo "Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de Yucatán", se realizó una experimentación siguiendo las normas ASTM C-177 y C-508, utilizando un sistema adiabático y geometría de paralelepípedo. El objetivo era determinar la conductividad térmica de materiales en polvo de uso común en la región (Mena-Novelo, Un-Aragón, Corona, Romero, & Oliva, 2015).

El confort térmico es de vital importancia en cualquier edificio habitable. Por esta razón, se han llevado a cabo estudios durante varios años, como en el artículo "Determinación experimental de las condiciones de confort térmico en edificaciones", donde se muestra mediante un análisis que las personas tienden a preferir superar el límite superior de la zona de confort establecida en los estándares internacionales (Ambríz García, García Chávez, & Paredes Rubio, 2009).

En otros estudios, se han realizado pruebas en edificaciones ya construidas para monitorear su confort térmico y verificar su consumo de energía. Un caso relevante es el artículo titulado "Impact of external insulation and internal thermal density upon energy consumption of buildings in a temperate climate with four distinct seasons", que se enfocó en el análisis de un edificio ubicado en un clima templado en Seúl, Corea del Sur (Lee, Kim, Song, Kim, & Jang, 2016)s.

También existen métodos para calcular la transmitancia térmica en los envolventes, ya que estos influyen en el confort térmico del interior. En el texto "Cálculo de la transmitancia térmica de un muro de fachada", se presenta un cálculo aplicando las limitaciones de la demanda energética que se encuentran en el Código Técnico de la Edificación (Pastor Villa, 2018).

La elección adecuada de materiales para la construcción de edificios eficientes es de suma importancia, y para lograrlo es necesario conocer las propiedades de los materiales. En el artículo "Comparación del comportamiento térmico de muros

de concreto armado y de bloques de concreto hueco", se realiza una comparativa entre estos dos sistemas utilizando la herramienta numérica Ener-Habitat. Los resultados indican que el sistema de bloques de concreto es más adecuado para el uso de aire acondicionado en el interior, debido a su mejor comportamiento térmico. Por otro lado, el sistema de concreto armado muestra una resistencia térmica menor y no se recomienda su uso con aire acondicionado (Molar-Orozco & Huelsz-Lebros, 2017). Estos hallazgos son valiosos para la selección óptima de materiales y sistemas constructivos en edificaciones orientadas a la eficiencia energética.

La búsqueda de materiales alternativos para la construcción ha llevado a investigaciones como el artículo "Construcción sustentable: análisis de retraso térmico en bloques de tierra comprimida" que destaca el uso de Bloques de Tierra Comprimida (BTC). Los resultados muestran que estos bloques mejoran el confort térmico en viviendas en comparación con ladrillos recocidos y bloques de concreto, y poseen un mayor retraso térmico (Roux Gutiérrez & Gallegos Sánchez, 2015). Estos avances promueven una construcción más sostenible, eficiente y respetuosa con el medio ambiente, lo que es esencial para enfrentar los desafíos del cambio climático y promover un desarrollo urbano responsable.

En el estudio "Adding hydrated lime in a material made of clayey soil and fibres: Formulation and effects on thermo-mechanical properties," se utilizaron pruebas con el analizador térmico KD2 para evaluar la conductividad térmica de un material destinado a la envolvente de edificios, compuesto principalmente de tierra arcillosa y fibras, con la adición de cal para conocer sus características térmicas. Los resultados mostraron que la cal mejoró el aislamiento térmico del material, aunque disminuyó su inercia térmica y resistencia mecánica (Zoma, Yonli, Malbila, Toguyeni, & Hassel, 2020).

En el artículo "Electrical and thermal characterization of cement-based mortars containing recycled metallic waste", se realizaron análisis de morteros de cemento que contenían fibras y virutas de acero con el objetivo de conocer su rendimiento térmico y propiedades físicas, tales como la densidad aparente y la porosidad. Estas mezclas experimentales incorporaron distintos tipos de agregados, incluyendo las fibras y virutas de acero reciclado. El estudio buscó evaluar cómo la presencia de estos agregados influía en el comportamiento térmico de los morteros, proporcionando datos relevantes para la caracterización y selección de materiales que puedan ser utilizados en aplicaciones de construcción eficiente y sostenible (Norambuena-Contreras, Quilodran, Gonzalez-Torre, Chavez, & Borinaga-Trevino, 2018).

En el artículo "A review on insulation materials for energy conservation in buildings" se aborda la preocupación mundial sobre el calentamiento global y el confort

térmico, centrándose en diversos tipos de aislantes que pueden contribuir a mantener una temperatura agradable en el interior de los edificios, al mismo tiempo que son sostenibles. El estudio analiza el ciclo de vida de estos materiales aislantes y su potencial para reducir las emisiones, abarcando desde los materiales más recientes hasta la fecha de publicación del texto (Aditya, y otros, 2017).

Los estudios que evalúan el desempeño de edificaciones en condiciones reales son de gran importancia para avanzar hacia construcciones más sostenibles y energéticamente eficientes. Estos análisis proporcionan información valiosa que nos permite comprender y caracterizar las propiedades térmicas de los materiales utilizados en los morteros, lo que a su vez contribuye a mejorar el desempeño energético y la eficiencia térmica de las construcciones. Gracias a estos avances, podemos promover la reducción de la huella de carbono de los edificios y contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático. La implementación de materiales y técnicas más eficientes en el ámbito de la construcción es esencial para lograr un futuro más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

## **Normas**

Las normas de pruebas de experimentación desempeñan un papel fundamental al proporcionar metodologías estandarizadas y confiables para la evaluación de materiales de construcción. Estas normas establecen procedimientos precisos para medir las propiedades térmicas, mecánicas y físicas de los materiales, permitiendo la obtención de resultados consistentes y reproducibles. Al seguir estas normativas, los investigadores y profesionales del sector pueden asegurar la calidad y precisión de sus estudios, facilitando comparaciones válidas entre diferentes investigaciones y aplicaciones. Por lo que se revisaron las siguientes para esta investigación.

En el ámbito de la caracterización del desempeño térmico de los materiales, se destacan diversas normas relevantes. La norma ASTM C518 - 15 establece un método de prueba estándar para determinar las propiedades de transmisión térmica en estado estacionario mediante el uso de un aparato medidor de flujo de calor. Por su parte, la norma ASTM C177 - 13 define un procedimiento para generar un gradiente térmico en régimen estacionario en una muestra de espesor conocido, mediante una prueba de placa caliente protegida. Asimismo, la norma ASTM C1363 describe el diseño de una caja caliente utilizada para medir la resistencia térmica total de una muestra sujeta a un gradiente térmico. Por otro lado, la norma ASTM D5334-14 establece un procedimiento para determinar la conductividad térmica de rocas suaves y suelos a través de la transferencia de calor en estado transitorio. Además, la norma ISO 8301:1991 se enfoca en la

caracterización de materiales aislantes mediante el uso de medidores de flujo térmico, considerando la convección, radiación y conducción térmica.

Por otro lado, la norma NMXAA-164-SCFI-2013 establece criterios y requerimientos ambientales mínimos para la edificación sustentable, mientras que las normas NMX-C-181-ONNCCE-2010 y NMX-C-189-ONNCCE-2010 especifican el uso de medidores de flujo de calor y placas calientes aisladas para medir la conductividad térmica de los materiales. La norma NOM-008-ENER proporciona una guía de cálculo para reducir las ganancias de calor a través de la envolvente del edificio, con el objetivo de disminuir la demanda de energía para refrigeración. Por su parte, las normas NCh 851.0f2008, ISO 8990:1994 y la norma chilena NCh853.0f2007 establecen métodos para determinar las propiedades de transmisión térmica en estado estacionario y resistencia térmica de componentes y elementos de construcción. Finalmente, la norma IRAM 11601 define los valores y métodos fundamentales para el cálculo de las propiedades térmicas de componentes y elementos de construcción en régimen estacionario.

Estas normas desempeñan un papel fundamental en la caracterización y evaluación del comportamiento térmico de los materiales utilizados en la construcción. Al proporcionar pautas y procedimientos estandarizados, aseguran la eficiencia energética y la calidad en el diseño de los edificios, facilitando así el avance hacia construcciones más sostenibles y energéticamente eficientes.

## **Marco de referencia**

El marco teórico presenta los conceptos para la comprensión integral sobre los morteros y sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Se explorarán aspectos fundamentales como la densidad de los materiales, incluyendo los morteros de baja densidad y su relevancia en diversas aplicaciones constructivas. Además, se analizan las propiedades físicas de los materiales, como la resistividad eléctrica, la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia mecánica, con el objetivo de comprender cómo estas características influyen en el desempeño de los morteros en el contexto de la construcción. También se abordarán las propiedades térmicas de los materiales, incluyendo métodos para su evaluación en los proyectos de edificación. Se explorarán conceptos como la colorimetría para conocer como los agregados y cementantes afectan el color de los morteros. Por último, se examinará el concepto de sostenibilidad en la construcción y cómo los morteros pueden contribuir a la reducción del impacto ambiental y al uso eficiente de los recursos.

## Morteros

Son la mezcla de un aglutinante como cementante, agregados como la arena y agua, es utilizado para adherir, unir elementos de la construcción y protección del muro. Actualmente se clasifican en tipos:

**Tabla 1. Tipos de Morteros. (INIFED, 2015)**

Tipo	Partes de cemento Pórtland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de Arena
I	1	0	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a ½	0	
II	1	0	¼ a ½	
	1	½ a 1	0	
III	1	0	½ a ¼	

La función del recubrimiento de mortero es absorber irregularidades de elementos por cubrir, dar una base uniforme para recibir un acabado, proteger los elementos, puede utilizarse cemento y cal. (Subdirección Corporativa de Administración, pág. 83), y no se considera como elemento estructural por lo que no está sujeto a resistencias mínimas como es el caso de mortero para relleno y pegado de mampostería.

Los morteros tienen que contribuir con la protección, lo que es el aislamiento térmico, acústico, la resistencia a posible fuego, y debe de ser durable para resistir alteraciones químicas por acción del medio ambiente en el que están expuestos, la lixiviación que puede ser provocada por filtraciones del agua y las heladas, y al desgaste por impactos, aire o rozamientos (Monjo Carrió, 2005).



**Figura 1. Morteros como protección de las estructuras. Foto: tomada por el autor.**



**Figura 2. Los recubrimientos cubren irregularidades. Foto: tomada por el autor**

En las mamposterías, el mortero es el que une las piezas de manera que trabaje como un solo elemento integral, y que contenga ciertas características de función y desempeño. Consta de cementante, agregado y agua. (NMX-C-486-ONNCCE-2014, 2014)

Los morteros deben exhibir propiedades de resistencia mecánica, trabajabilidad, retracción durante el secado y retención de agua (Salamanca Correa, 2001), ya que es crucial tener un conocimiento exhaustivo de los materiales que componen el mortero. Además, es deseable que el mortero presente buenas características de trabajabilidad, la cual es definida por el Instituto Americano del Concreto como "la propiedad que determina la facilidad y uniformidad con la que puede ser colocado, compactado y mezclado" (Lizarazo Marriaga & Claisse, 2009)).

El agregado es el que le da volumen y cuerpo a la mezcla, actúa como relleno y proporciona trabajabilidad, este reduce la contracción y aporta a la resistencia a la compresión. La granulometría es importante ya que un excelente agregado reduce la separación de las partículas que mejora la trabajabilidad, y en el caso de pocos finos los morteros eran rugosos y un exceso de finos puede existir mayor agrietamiento por contracción y baja resistencia.

En esta investigación se centra la cal como cementante, este proporciona elasticidad que ayuda ante el cambio de volumen para reducir agrietamientos y en algunos casos el rellenando micro fisuras (Zoma, Yonli, Malbila, Toguyeni, & Hassel, 2020), trabajabilidad, alta retentividad, y mejora la impermeabilidad, e igual que el cemento tiene adherencia las mezclas. Su desventaja es su lenta

carbonatación por lo que a edades tempranas tienen bajas resistencia a la compresión (NMX-C-486-ONNCCE-2014, 2014).

### **Morteros de baja densidad**

La densidad se define como la relación entre la masa (en kilogramos) y el volumen (en metros cúbicos), y también se conoce como la masa por unidad de volumen. En el caso de los morteros, la densidad influye en sus propiedades mecánicas y en su capacidad de aislar el calor (Cuitiño-Rosales, Rotondaro, & Esteves, 2020). Una baja densidad aparente y conductividad térmica contribuyen significativamente a mejorar la eficiencia energética (Al-Jabri, Shoukry, Mokhtar, & Morsy, 2019).

Las mezclas de morteros de baja densidad son formulaciones especiales que utilizan materiales con una densidad reducida en comparación con los morteros convencionales. Estos morteros son adecuados para aplicaciones donde se busca reducir el peso en las estructuras, ya que ofrecen una mayor ligereza sin comprometer la resistencia. Para lograr esta reducción de densidad, se utilizan agregados livianos como cenizas, perlita, vermiculita o polietileno. Estos materiales proporcionan beneficios adicionales, como el mejoramiento del aislamiento térmico y acústico de las estructuras.

Un aspecto importante a considerar es que, a medida que se disminuye la densidad aparente del mortero, se mejora la eficiencia térmica de la construcción. Estudios como el realizado por Longo respaldan esta idea, demostrando que los morteros de baja densidad tienen propiedades que contribuyen a un mejor desempeño térmico en las edificaciones (Longo, et al, 2020).

La incorporación de aditivos, diversos tipos de agregados e incluso fibras en los morteros puede tener un efecto positivo en la reducción de la densidad aparente de los mismos. Esta disminución en la densidad aparente a su vez conlleva una reducción en la porosidad del material, lo que puede resultar en una mejora en la conductividad térmica de los morteros. En consecuencia, estos morteros modificados pueden ofrecer una mejor eficiencia térmica en comparación con los morteros convencionales (Santos, Nunes, & Faria, 2017).

Los morteros de baja densidad ofrecen ventajas como la reducción de peso, el mejoramiento del aislamiento térmico y acústico, y una mayor eficiencia térmica en comparación con los morteros convencionales, al igual que materiales aislantes se caracterizan por su baja densidad, conductividad y capacidad térmica y una alta porosidad (Ricciu, Besalduch, Galatioto, & Ciulla, 2017). Estas características los convierten en una opción atractiva para aplicaciones donde

se busca optimizar el rendimiento estructural y energético de los materiales de construcción.

Se ha establecido que a medida que la densidad de un material disminuye, su conductividad térmica se reduce, lo que a su vez aumenta la resistencia térmica (Holzhueter & Itonaga, 2017). Sin embargo, también es importante considerar que la temperatura y el contenido de agua de los materiales pueden influir en estas propiedades (Collet & Pretot, Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, 2014).

La cal tiene un peso específico inferior al del cemento, y el PET es un material que contribuye a reducir el peso específico en los morteros (Reis & Carneiro, 2011). Al comparar distintos agregados como la arena volcánica y el carbonato de calcio, que tienen una alta densidad, es posible establecer una comparación entre ellos, considerando que la conductividad térmica se relaciona con la densidad (Gutiérrez & González, 2012) de los materiales.

## Densidad de los materiales

Conocer la densidad de los materiales en los morteros es esencial para asegurar la calidad y durabilidad de las construcciones. Esta información proporciona un control preciso sobre la cantidad de cada componente utilizado en la mezcla, lo que contribuye al cumplimiento de estándares de calidad y a la prevención de posibles fallos estructurales. Además, la densidad influye en la trabajabilidad del mortero, afectando su consistencia y capacidad de adherencia, lo que es crucial para garantizar una correcta aplicación en el sitio de construcción. Por otro lado, comprender la densidad de los materiales permite realizar un diseño más eficiente de las mezclas de mortero, optimizando la relación entre los componentes para obtener las propiedades deseadas, como resistencia y durabilidad, con el menor desperdicio posible. Esto no solo beneficia la calidad de la construcción, sino también la eficiencia económica y ambiental del proyecto. En aplicaciones estructurales, como en la construcción de muros o losas, el conocimiento de la densidad de los materiales es fundamental para calcular la carga que pueden soportar y garantizar la seguridad de la estructura, lo que resalta aún más la importancia de este parámetro en la construcción.

La densidad de los materiales en los morteros es un factor clave que influye en diversos aspectos de la construcción, desde la calidad y durabilidad de las estructuras hasta la eficiencia y seguridad del proyecto en su conjunto.

Tabla 2. Densidad de los materiales usados. Fuente: Fichas técnicas.

Material	Fórmula	Densidad	Fuente
Cal de construcción	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.50-0.70 kg/l	(Calidra, 2020)
Cal con contenido de hidróxido con 90 %	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.60-0.70 kg/l	(Calidra, 2020)
Cal con contenido de hidróxido con 95 %	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	0.40-0.60 kg/l	(Calidra, 2020)
Carbonato de Calcio	$\text{CaCO}_3$	1.30-1.55 kg/l	(Calidra, 2021)
Tereftalato de polietileno PET	$(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$	1.35 kg/l	(Material Properties,s.v., 2023)
Cemento	Clinker	3.15 kg/l	(ARGOS, 2023)

Los estudios indican que los morteros con reducción de densidad aparente muestran una mejor eficiencia térmica lograda mediante la incorporación de agregados ligeros y finos (Longo, Lassandro, Moshiri, Phatak, Aiello, & Krakowiak, 2020). La cantidad de aire presente en los materiales puede determinarse a través de pruebas de velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica.

Además, la literatura señala que la conductividad térmica aumenta aproximadamente en un 54% cuando la densidad se incrementa en 2/3, mientras que solo aumenta en un 15-20% desde el estado seco hasta el 90% de humedad relativa (Collet & Pretot, 2014) Por lo tanto, para mejorar el desempeño térmico de los morteros, es crucial reducir su densidad y seleccionar cementantes y agregados con estas características.

En cuanto al cementante utilizado en los morteros, la cal muestra buenas propiedades térmicas, además de proporcionar beneficios en términos de bajo costo y consumo energético (Stefanidou, Assael, Antoniadis, & Matziaroglou, 2010) En cuanto a los agregados que contribuyen a un mejor desempeño térmico, se encuentran el caucho de desecho, plásticos, cenizas de lodo, virutas de madera y fibras de palmera datilera (Longo, Lassandro, Moshiri, Phatak, Aiello, & Krakowiak, 2020) debido a su menor densidad. Estos factores son fundamentales para lograr un adecuado control del confort térmico en los edificios.

Exactamente, los morteros desempeñan un papel crucial como parte de la envolvente en la construcción de edificios. La envolvente es fundamental para el control del confort térmico en el interior de los edificios, ya que actúa como una barrera entre el ambiente exterior y el interior habitable. Debido a su composición y propiedades térmicas, los morteros pueden contribuir significativamente a mejorar la eficiencia energética del edificio. Para que un sistema de envolvente sea eficiente desde el punto de vista térmico, no solo es importante tener en cuenta las propiedades del material utilizado, sino también las capas o componentes que conforman dicho sistema (Huelsz, Barrios, Rechtman, & Rojas).

La envolvente del edificio juega un papel clave en la retención y regulación del calor dentro del espacio habitable. Según estudios, alrededor del 50% al 60% de

la pérdida o ganancia total de calor en un edificio ocurre a través de la envolvente (Kumar, Alam, Zou, Sanjayan, & Memon, 2020). Un mortero bien diseñado y correctamente aplicado puede reducir las pérdidas de calor en invierno y minimizar el ingreso de calor no deseado en verano, lo que se traduce en un menor consumo de energía para calefacción y refrigeración.

Algunos materiales utilizados en la construcción, como la piedra caliza, debido a su alta densidad (Lage-Cal, Folgueras-Díaz, & Luengo-García, 2018), pueden contribuir a otorgar una mayor inercia térmica al edificio, lo que implica una mayor capacidad de almacenar y liberar calor en su interior

Es esencial conocer cada capa de la envolvente de los edificios, la cual se puede dividir en dos categorías principales: homogéneas y no homogéneas. Las capas homogéneas son continuas y uniformes, mientras que las capas no homogéneas pueden contener espacios o materiales aislantes que contribuyen a mejorar la eficiencia térmica del edificio (Comisión Nacional para el uso eficiente de la Energía, 2011). Existe un término conocido como 'envolvente térmica', que se refiere a la piel del edificio y está conformada por los elementos que separan los espacios no habitables y habitables del exterior (Pastor Villa, 2018).

Conocer la composición de cada capa de la envolvente es fundamental para el diseño y construcción de edificios energéticamente eficientes, ya que esto permite reducir la transferencia de calor (Molar-Orozco & Huelsz-Lebros, 2017). Los materiales empleados en cada capa, junto con su densidad y características térmicas, desempeñan un papel crucial en el comportamiento térmico global del edificio. Al elegir materiales adecuados y considerar la disposición de las capas, es posible optimizar el rendimiento térmico de la edificación, asegurando una temperatura interior confortable y reduciendo el consumo de energía necesario para calefacción o refrigeración.

Además, una selección y diseño apropiados de la envolvente pueden contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, fomentando el desarrollo de edificaciones más sostenibles y amigables con el medio ambiente, ya que reducir la temperatura de los muros expuestos a la radiación puede extender la vida útil de los edificios (Ascione, Bellia,, Mazzei, & Minichiello, 2010). La implementación de soluciones inteligentes en la envolvente térmica de los edificios no solo proporciona beneficios económicos a largo plazo, sino que también juega un rol crucial en la mitigación del cambio climático y en la promoción de prácticas constructivas más respetuosas con el entorno. Por lo tanto, una consideración cuidadosa de los materiales y la configuración de la envolvente se convierte en una herramienta esencial para alcanzar la eficiencia energética y la sostenibilidad en la construcción de edificaciones modernas.

## Propiedades físicas de los materiales

### Resistividad eléctrica, RE

Las pruebas o análisis de resistividad eléctrica en los materiales buscan obtener información sobre su capacidad para resistir el paso de corriente eléctrica. Esta información es crucial para evaluar la idoneidad de los materiales en aplicaciones donde se requiere aislamiento eléctrico o control de la conductividad eléctrica, como en sistemas de cableado, estructuras eléctricas o revestimientos protectores. Al conocer la resistividad eléctrica de los materiales, podemos determinar su eficacia para prevenir cortocircuitos, evitar interferencias electromagnéticas o proteger equipos sensibles. Esto contribuye al cumplimiento de los objetivos del proyecto al garantizar la seguridad, eficiencia y fiabilidad de los sistemas eléctricos y electrónicos involucrados. Además, estas pruebas pueden ayudar a validar o refutar hipótesis sobre la relación entre la composición o tratamiento de los materiales y sus propiedades eléctricas, lo que permite ajustes en el diseño o selección de materiales para optimizar el rendimiento y cumplir con los estándares requeridos. El análisis de resistividad eléctrica proporciona datos cruciales para la selección y diseño de materiales en aplicaciones eléctricas, contribuyendo así al logro de los objetivos del proyecto y la validación de las hipótesis planteadas en relación con las propiedades físicas de los materiales.

La porosidad, definida por Santos A.R. como el volumen total de espacios abiertos dentro de la estructura de los materiales, puede comprender grietas y poros. Es crucial tener en cuenta que la porosidad influye en las propiedades mecánicas de los materiales de construcción, así como en su resistividad eléctrica. Los agregados utilizados en la mezcla desempeñan un papel clave en la distribución y tamaño de los poros, lo que a su vez afecta la conductividad eléctrica de los materiales (Santos, Veiga, Silva, de Brito, & Álvarez, 2018). Por lo tanto, comprender y controlar la porosidad en los materiales de construcción es esencial para lograr propiedades eléctricas y mecánicas adecuadas en aplicaciones de construcción.

La resistividad eléctrica nos puede indicar el estado en que se encuentra un mortero ya que cambia cuando se degrada, hay ataques externos entre otros, ya que cambian su conductividad (Cosoli, et al., 2020). Esta prueba se utiliza para valorar la capacidad que tiene un morteros para resistir la corriente eléctrica, esto nos sirve para evaluar la durabilidad y calidad de los morteros ante la corrosión, además con esta prueba no destructiva se puede conocer la microestructura de su porosidad, la propia estructura, disposición y tamaño de los poros, este parámetro también nos permite relacionarlo con la resistencia a la compresión. Si el resultado de la resistividad es mayor menor será la porosidad

(Andrade & Andrea, 2011) y por lo tanto es de mejor calidad. También se considera que las porosidad contribuye con el desempeño térmico (Longo et al., 2020).



**Figura 3. Aparato para medir la resistividad eléctrica. Foto: tomada por el autor**

Se basa en la ley de OHM que es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas (Andrade & Andrea, 2011), en base a la siguiente fórmula:

**Ecuación 1. Ley de Ohm**

$$R = V/I$$

donde:

R=resistencia eléctrica en Ohmios ( $\Omega$ )

V=voltaje en voltios (V)

I = corriente en amperios (A)

**Velocidad de pulso ultrasónico, VPU**

Las pruebas o análisis de velocidad de pulso ultrasónico en morteros para la construcción buscan obtener información sobre la capacidad de transmisión de ondas ultrasónicas a través del material. Esta información es crucial para evaluar la calidad del mortero y su integridad estructural, así como para detectar posibles defectos internos, como grietas, vacíos o segregación de agregados. Al conocer la velocidad de pulso ultrasónico de un mortero, podemos determinar su

uniformidad, resistencia y cohesión, lo que contribuye a garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras construidas. Estas pruebas ayudan a validar o refutar hipótesis sobre la relación entre la composición, porosidad o tratamiento del mortero y su comportamiento acústico, permitiendo ajustes en el diseño o selección de materiales para optimizar el rendimiento y cumplir con los estándares requeridos. El análisis de velocidad de pulso ultrasónico en morteros para la construcción proporciona datos esenciales para la evaluación de la calidad y integridad estructural, contribuyendo al logro de los objetivos del proyecto y la validación de las hipótesis planteadas en relación con las propiedades acústicas y estructurales de los morteros.

Esta prueba, no destructiva, detecta la propagación de ondas ultrasónicas en un medio elástico y se realiza para evaluar la densidad y homogeneidad de un material en estado seco. El procedimiento implica colocar transductores electroacústicos en contacto con los cubos utilizando un lubricante para asegurar un medio continuo. Luego, se generan impulsos que son recibidos por el segundo transductor, obteniéndose así una lectura. La medición se expresa en metros por segundo (m/s).



**Figura 4. Medición de la velocidad de pulso ultrasónico.. Foto: Tomada por el autor.**

En base a esta prueba podemos considerar la durabilidad y resistencia, ya que entre más denso su capacidad de carga es mayor, tienen mayor capacidad de detener el calor, es mejor aislante acústico.

## Resistencia mecánica

Las pruebas o análisis de resistencia mecánica en morteros para la construcción buscan obtener información sobre la capacidad del material para soportar cargas y fuerzas externas. Esta información es fundamental para evaluar la idoneidad del mortero en aplicaciones estructurales y determinar su resistencia a la compresión, flexión o tracción. Al conocer la resistencia mecánica del mortero, podemos determinar su adecuación para diferentes usos, como en la construcción de muros, losas, o pavimentos, y garantizar la seguridad y durabilidad de las estructuras construidas. Estas pruebas ayudan a validar o refutar hipótesis sobre la relación entre la composición, dosificación, curado o aditivos del mortero y su resistencia mecánica, permitiendo ajustes en el diseño o selección de materiales para optimizar el rendimiento y cumplir con los estándares requeridos. En resumen, el análisis de resistencia mecánica en morteros para la construcción proporciona datos esenciales para la evaluación de la calidad y funcionalidad del material, contribuyendo al logro de los objetivos del proyecto y la validación de las hipótesis planteadas en relación con las propiedades mecánicas de los morteros.

La resistencia a compresión es la medida máxima de resistencia de especímenes endurecidos de matrices de cal, cemento, yeso o polímeros, ya sea que contengan áridos o no, bajo una carga axial. Se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado ( $\text{kgf/cm}^2$ ). Estos datos se utilizan principalmente en cálculos estructurales. En el caso de los morteros, se emplean para evaluar la resistencia a los impactos en los aplanados y la carga que el mortero debe soportar para el pegado de mampostería y la ejecución de firmes. Además, permiten inferir la adherencia, adhesividad, elasticidad y nivel de protección frente a agentes meteorológicos.



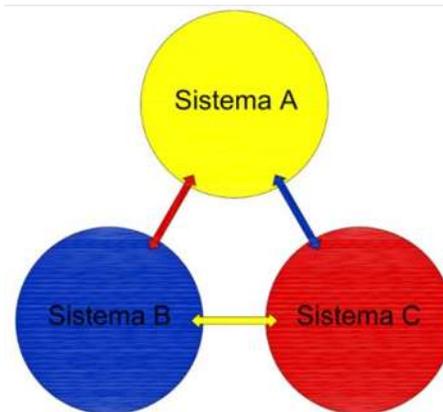
**Figura 5. Prueba de resistencia a la compresión. Foto: tomada por el autor.**

## Propiedades térmicas

Las pruebas o análisis de propiedades térmicas en morteros para la construcción buscan obtener información sobre la capacidad del material para resistir o transmitir el calor. Esta información es crucial para evaluar la eficiencia energética de las estructuras construidas y su capacidad para mantener un ambiente interior confortable. Al conocer las propiedades térmicas del mortero, como la

conductividad térmica, capacidad calorífica y resistencia al fuego, podemos determinar su adecuación para aplicaciones donde se requiera aislamiento térmico o protección contra incendios. Estas pruebas ayudan a validar o refutar hipótesis sobre la relación entre la composición, densidad o porosidad del mortero y sus propiedades térmicas, permitiendo ajustes en el diseño o selección de materiales para optimizar el rendimiento y cumplir con los estándares requeridos. El análisis de propiedades térmicas en morteros para la construcción proporciona datos esenciales para la evaluación de la eficiencia energética y seguridad de las estructuras, contribuyendo al logro de los objetivos del proyecto y la validación de las hipótesis planteadas en relación con las propiedades térmicas de los morteros.

El desempeño térmico de los materiales se fundamenta en sus propiedades térmicas y cómo interactúan con su entorno. Esto se debe al principio de equilibrio térmico o ley cero de la termodinámica figura 7, que establece que los sistemas tienden a alcanzar un equilibrio térmico con su entorno (Del Rincón Maravilla, 2012). En consecuencia, los cuerpos, sistemas o elementos intercambian calor con otros que estén en contacto, buscando igualar sus temperaturas. Es mediante esta transferencia de calor que se logra una distribución más uniforme de la energía térmica en un sistema o estructura, lo que resulta crucial en la evaluación y diseño de materiales y envolventes para la construcción de edificios con un óptimo confort térmico y eficiencia energética.



**Figura 6. Esquema del equilibrio térmico. Realizado por el autor**

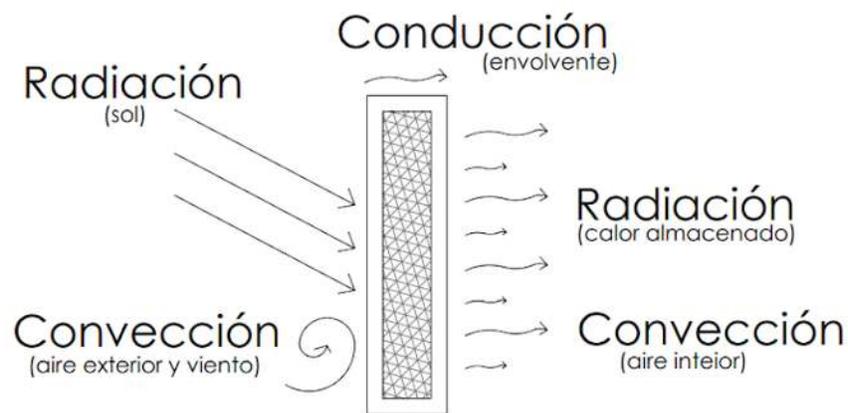
La transferencia de calor en los materiales y envolventes de los edificios se realiza a través de tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación.

**Conducción:** Es la transmisión de calor entre dos cuerpos que están en contacto directo. La energía cinética de las moléculas se transfiere de las más calientes a las más frías, buscando alcanzar el equilibrio térmico. Este proceso es fundamental

en materiales sólidos y se puede mejorar utilizando materiales con baja conductividad térmica para reducir las pérdidas de calor.

Convección: Implica el transporte de calor a través de materiales fluidos, como el aire o el agua. En el caso de los edificios, la convección térmica ocurre cuando el aire caliente se eleva y es reemplazado por aire más frío, creando una circulación que afecta la temperatura en el interior y exterior de las estructuras.

Radiación: Es el proceso mediante el cual un cuerpo emite energía térmica en forma de ondas electromagnéticas, principalmente en forma de radiación infrarroja. Esta radiación es absorbida por otros cuerpos, calentándolos. En los edificios, la radiación térmica puede influir en la transferencia de calor a través de superficies expuestas al sol (Del Rincón Maravilla, 2012).



**Figura 7. Transferencia térmica en elementos opacos. Realizado por el autor.**

Estos mecanismos de transferencia de calor tienen un impacto significativo en el desempeño térmico de los materiales y en la eficiencia energética de los edificios. Por lo tanto, es esencial considerarlos en el diseño y selección de materiales para lograr un ambiente interior confortable y reducir el consumo de energía en climatización.

El desempeño térmico de los materiales y elementos constructivos es fundamental para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico en los edificios. Según Del Rincón Maravilla (2012), este desempeño se basa en las propiedades térmicas de los materiales y su comportamiento ante el medio ambiente circundante. La transferencia de calor se produce a través de tres formas principales: conducción, convección y radiación. La conducción implica la transmisión de energía cinética de un cuerpo a otro por contacto directo, mientras que la convección ocurre en materiales fluidos como el agua o el aire. Por otro lado, la radiación se emite por un cuerpo debido a su temperatura, a través de ondas electromagnéticas.

Para reducir la cantidad de calor que se transmite a través de los materiales y elementos constructivos, es necesario mejorarlos y buscar materiales más eficientes en términos de aislamiento térmico. Esto se logra mediante el cálculo del coeficiente de conductividad térmica ( $\lambda$ ) en vatios / (metro  $\times$  Kelvin), que es una medida de la capacidad de un material para conducir el calor. Cuanto menor sea el valor de  $\lambda$ , mejor será el aislamiento térmico del material, lo que resulta en una menor transferencia de calor a través del mismo (Comisión Nacional para el uso eficiente de la Energía, 2011). Adicionalmente, existen otras propiedades térmicas que deben ser analizadas, como el coeficiente de transmisión térmica (U) y la resistencia térmica (R), que indican el rendimiento térmico global de un elemento constructivo y su capacidad para resistir la transmisión de calor, respectivamente (Lira Cortés, García Duarte, Méndez Lángo, & González Durán, 2010).

Además de las propiedades térmicas, también es importante considerar otras características de los materiales y elementos constructivos, como la capacidad térmica específica, la absorción solar y la emisividad térmica. Estas propiedades afectan la inercia térmica de los materiales y su capacidad para regular las fluctuaciones de temperatura, así como su capacidad para absorber la radiación solar y emitir calor radiante hacia el exterior (Del Rincón Maravilla, 2012).

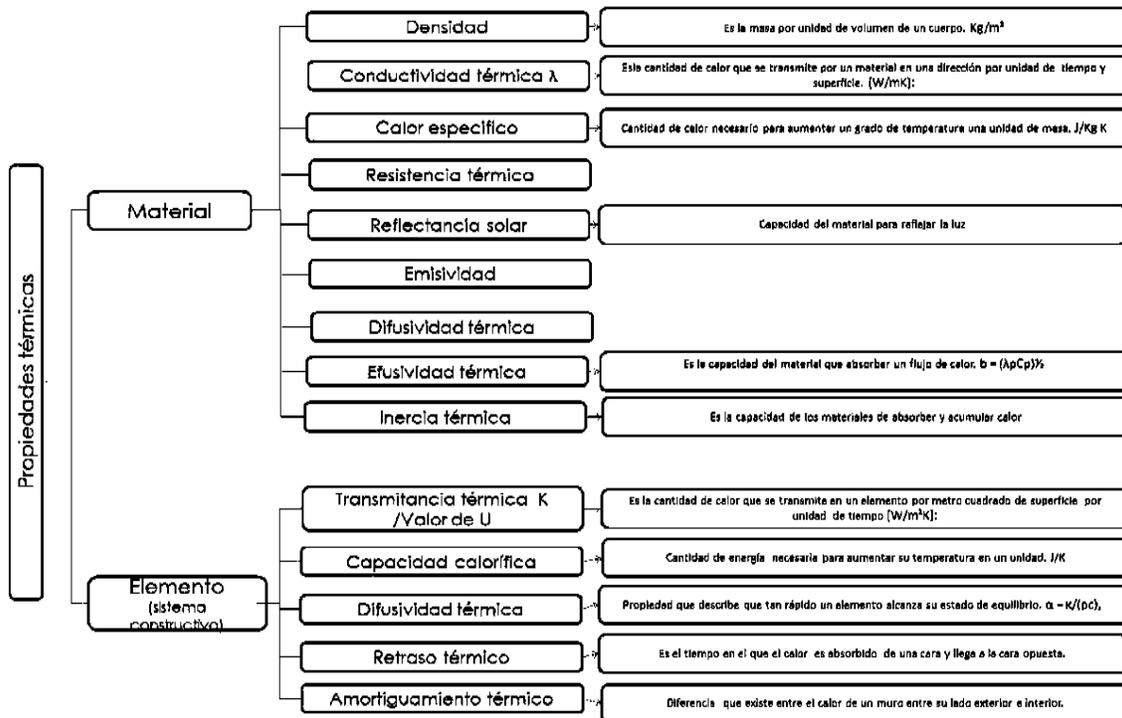


Figura 8. Propiedades térmicas de los materiales y elementos. Realizado por el autor

## Propiedades térmicas de los materiales

	Nomenclatura	Unidades
b=	efusividad térmica	$J/m^2Ks^{1/2}$
$\lambda$ =	conductividad térmica	$W/(m \cdot K)$
$\rho$ =	densidad	$kg/m^3$
$C_p$ =	calor específico	$J/kg \cdot K$
$\alpha$ =	difusividad térmica	$m^2/s$
K=	Transmitancia térmica	$W/m^2K$

La propiedad térmica de los materiales se puede caracterizar mediante diferentes parámetros, entre ellos la densidad ( $\rho$ ), que representa la masa por unidad de volumen de un cuerpo, y cuya unidad es  $kg/m^3$ . Otro parámetro importante es la conductividad térmica ( $\lambda$ ), que se refiere al calor transmitido en una sola dirección por unidad de tiempo y superficie, y su unidad es  $W/(m \cdot K)$  (Cuitiño-Rosales, Rotondaro, & Esteves, 2020) Esta propiedad es esencial para proponer, diseñar o predecir el mejor aprovechamiento de la energía en materiales y sistemas constructivos. Además, la conductividad térmica es relevante para desarrollar nuevos métodos de aprovechamiento de la energía (Mena-Novelo, Un-Aragón, Corona, Romero, & Oliva, 2015) Su expresión matemática es:

### Ecuación 2. Conductividad térmica

$$Q = \lambda \cdot dT/dx$$

donde:

Q= es el flujo del calor por unidad de área (watt)

$\lambda$ =conductividad de térmica ( $W/m \cdot K$ )

$dT/dx$ = es el gradiente de temperatura través del conductor (centígrados ó kelvin)

El signo de menos (-) se considera porque indica que el flujo de calor es de caliente frío (Nope Gómez & De Santiago, 2014).

El **calor específico ( $C_p$ )** es la cantidad de calor necesario para aumentar un grado de temperatura, esta nos sirve para determinar la capacidad del material para acumular calor (Hernández, 2014), su unidad es  $Kcal/m^3 \cdot ^\circ C$  o  $J/m^3 \cdot ^\circ K$  y es lo

que determina su la **inercia térmica** que es la capacidad de los materiales de absorber y acumular calor (Cuitiño Rosales M. G, 2020), ya que se consigue de multiplicar el calor específico y la densidad.

La **efusividad térmica (b)** es la capacidad de un material para absorber un flujo de calor y la **difusividad térmica (a)** es la capacidad del material para transmitir una variación de temperatura (Hernández, 2014), también (a) se refiere a que tan rápido un material alcanza el estado de equilibrio (Gutiérrez & Rodríguez, 2019).

La **reflectancia solar** es la capacidad de los materiales de reflejar la luz y con ello aporta a que la absorción de calor no sea mayor.

Las propiedades térmicas de los elementos son la **Transmitancia térmica** que es también conocido como el **valor U**, este es las cantidad de calor que se transmite de un elemento por metro cuadrado de superficies por unidad de tiempo y gradiente unitario entre las caras exterior e interior (Cuitiño Rosales M. G, 2020), su unidad es  $W/(m^2 \cdot K)$ .

Si mayor el Valor de U tendrá un menor aislamiento térmico, en cuanto la Transmitancia térmica sea menor este tendrá menor pérdida de calor, como se muestra en la imagen 2.

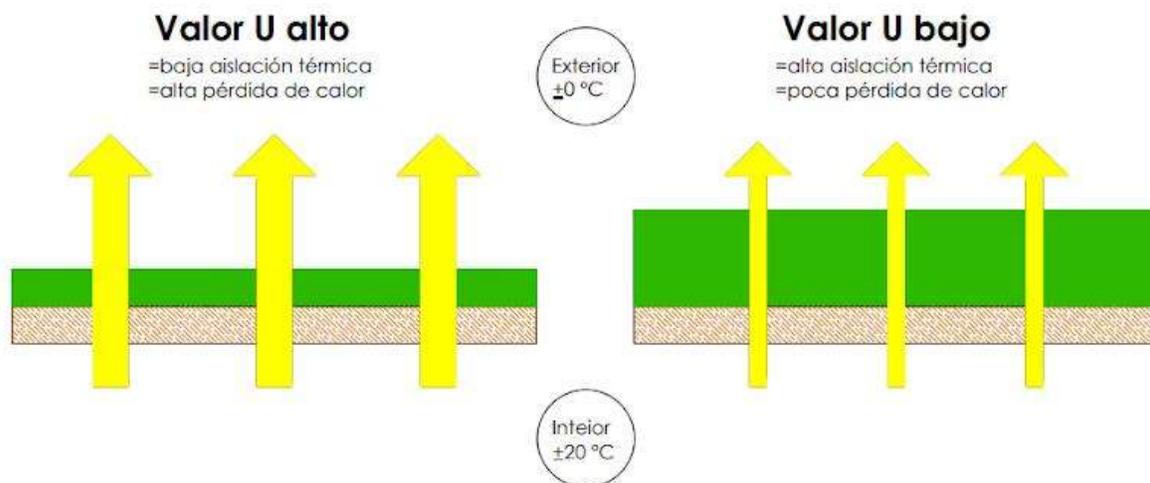


Figura 9. Valor de U alto y bajo. Basado en (Blender, 2015)

La **capacidad calorífica** de los elementos es la cantidad de energía que es necesario aplicar a un elemento para aumentar su temperatura en una unidad, se mide en (J/K) (Muñoz, Thomas, & Marino, 2015).

El **retraso térmico** y el **amortiguamiento térmico** pueden aportar con el calentamiento pasivo de los elementos para posteriormente liberarlo horas

después, el primero se refiere al tiempo que el calor tarda en pasar a través del elemento y está medido en horas, mientras que el amortiguamiento mide la reducción de la temperatura en forma cíclica respecto a las caras interiores y exteriores (Muñoz, Thomas, & Marino, 2015) (gráfica 1).

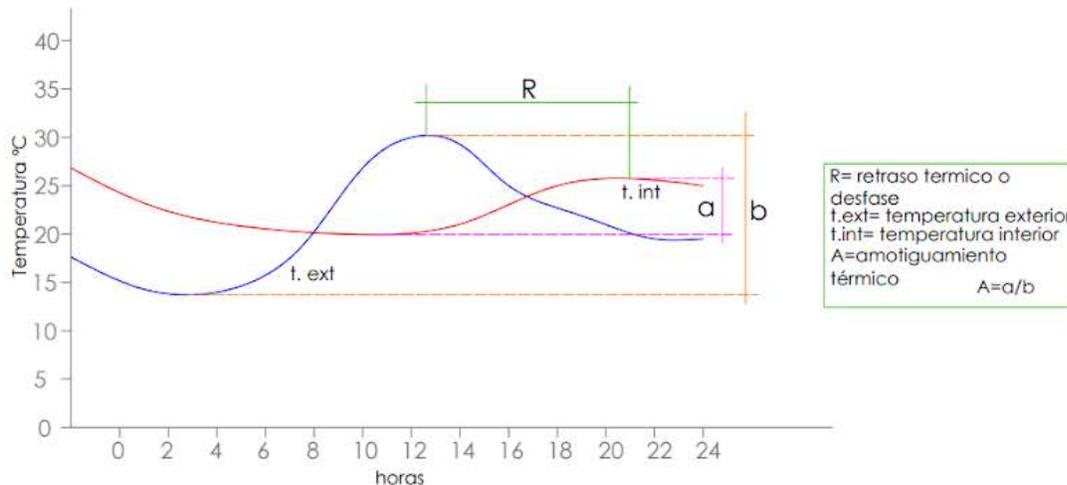


Gráfico. 1. Retraso térmico y el amortiguamiento térmico

**La conductividad térmica** es un factor importante para realizar un diseño ya que muchas veces se debe considerar el aislamiento térmico de los edificios, por lo que para la selección de materiales necesarios para tener un espacio confortable. Los materiales mayor conductividad térmica son los metales, mientras que los aislantes son bajos como el polietileno.

La conductividad térmica es una propiedad física que tienen los materiales que es su capacidad de conducir el calor, es decir cuánto calor se puede transferir a través de un material en una unidad de tiempo y área específica de dos caras, su unidad de medida es watts por metro kelvin ( $W/m \cdot K$ ). Cuando el valor es alto tiene mayor capacidad de conducir el calor y un menor valor existe mayor resistencia a la transferencia del calor.

Para medir la conductividad térmica se puede realizar por medio de diferentes métodos.

### Métodos para determinar las propiedades térmicas

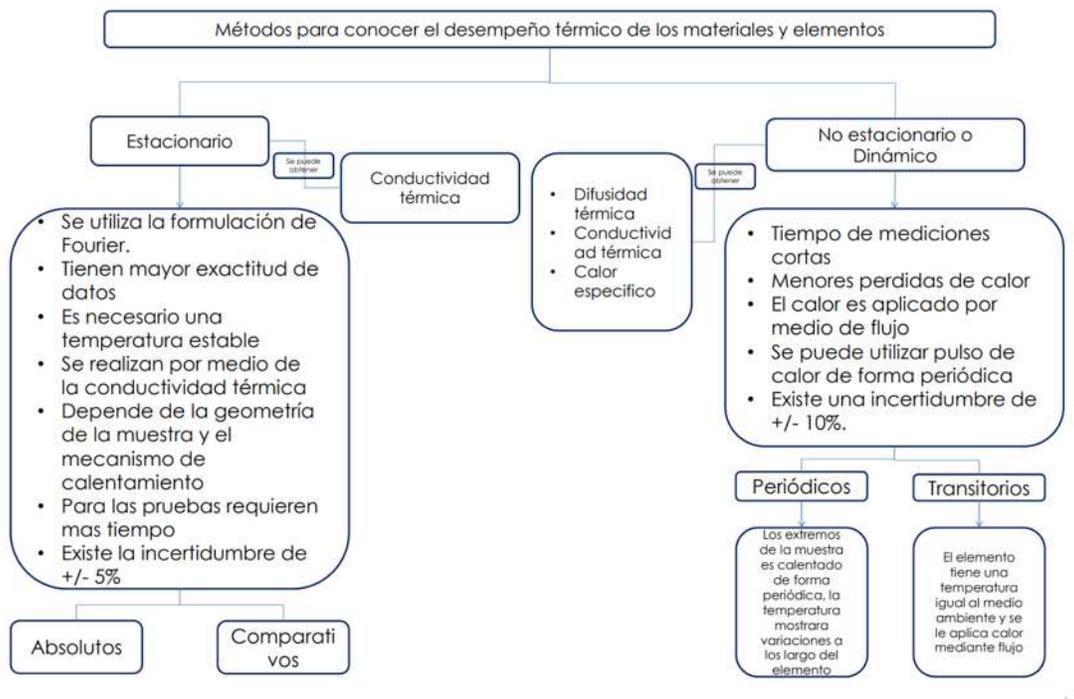
Existen métodos experimentales para determinar las propiedades térmicas de los materiales, y dos de los enfoques más comunes son el método estacionario y el método no estacionario o dinámico.

El método estacionario se basa en la Ley de Fourier, que establece que el flujo de calor a través de un material es proporcional al gradiente de temperatura y a la

conductividad térmica del material. En este método, se establece un gradiente de temperatura constante en el material y se mide la cantidad de calor que fluye a través de él. Con esta información, se puede determinar la conductividad térmica del material.

Por otro lado, el método no estacionario o dinámico se basa en la medición del tiempo que tarda un material en alcanzar el equilibrio térmico después de ser sometido a un cambio brusco en la temperatura. En este método, se aplica un pulso de calor al material y se mide la velocidad a la que el calor se propaga a través de él. Con estos datos, se puede calcular la difusividad térmica del material, que está relacionada con su capacidad para conducir el calor.

Ambos métodos son útiles para determinar las propiedades térmicas de los materiales y contribuyen a la comprensión de su comportamiento térmico en diferentes aplicaciones, como la construcción de edificios eficientes energéticamente.



**Figura 10. Métodos para obtener desempeño térmico de los materiales. Realizado por el autor.**

Los métodos estacionarios se fundamentan en la transferencia del calor desde una cara del elemento hacia la otra (imagen 3), manteniendo una condición constante a lo largo del tiempo. Por otro lado, los métodos transitorios se caracterizan por el desplazamiento del calor desde el centro del elemento hacia el exterior (imagen 4), en un proceso que evoluciona con el tiempo. Ambos

enfoques son valiosos para la determinación de las propiedades térmicas de los materiales y ofrecen una visión completa de cómo el calor se comporta en diferentes situaciones, contribuyendo al diseño y desarrollo de materiales y sistemas constructivos con óptimas propiedades térmicas.

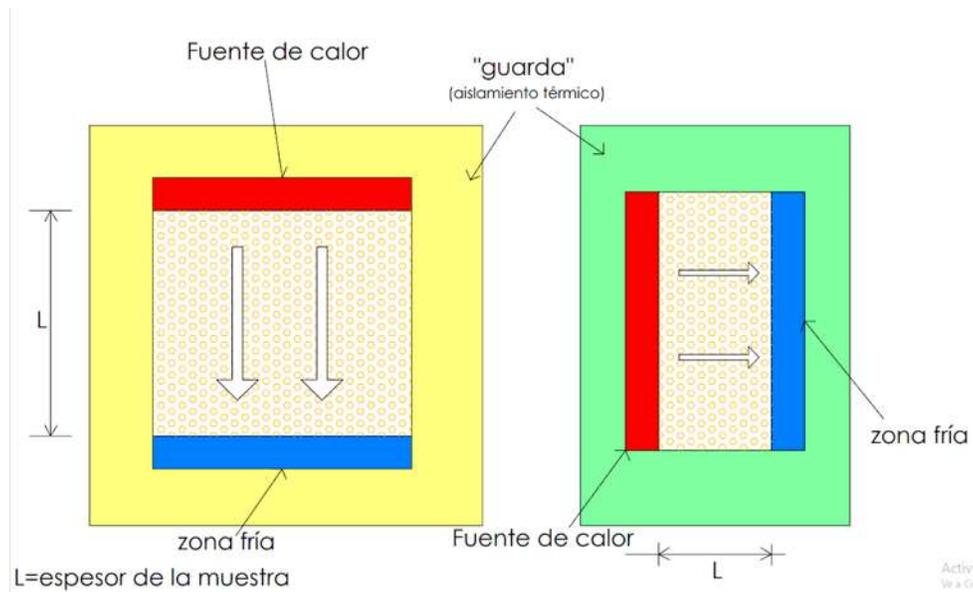


Figura 11. Esquema de principio de los métodos en régimen estacionario. A la izquierda método para espesores medios, a la derecha métodos para pequeños espesores. Basado en (Alvarado Ramírez, 2011)

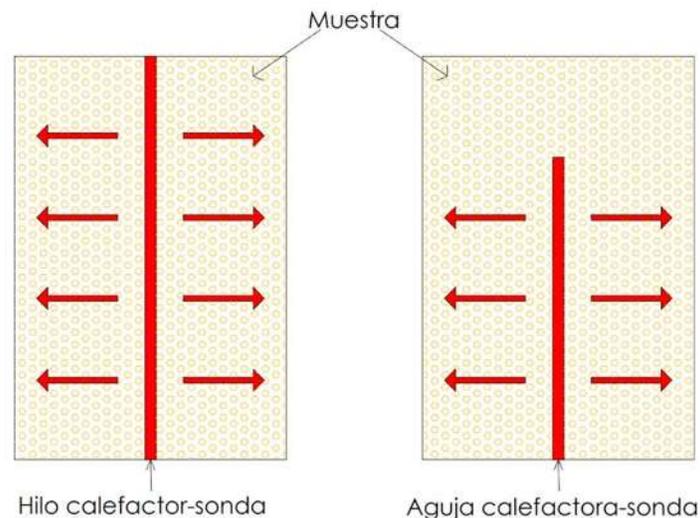
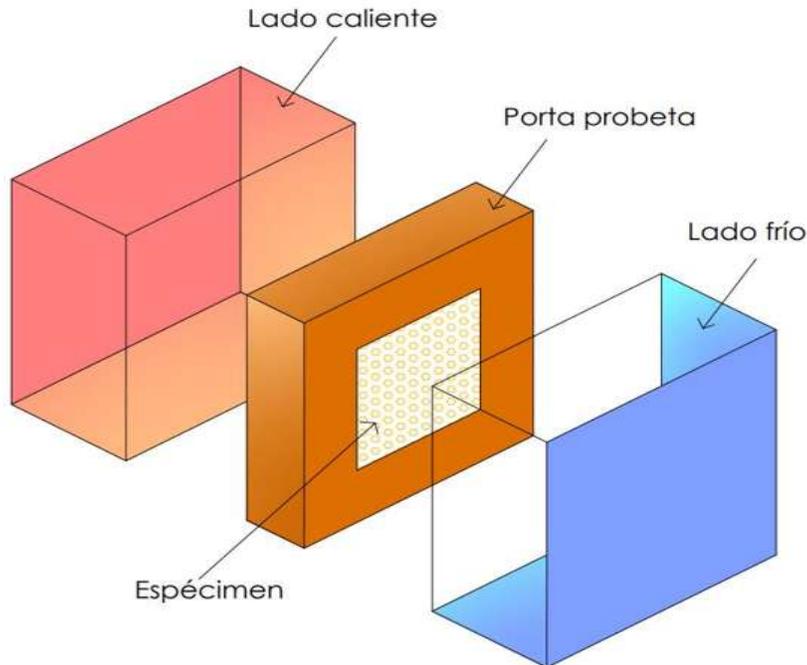


Figura 12. Esquema de principio de los métodos de fuente lineal de calor transitorio. Izquierda Método de Hilo caliente con una única sonda, a la derecha el Método de la Aguja térmica. Basado en (Alvarado Ramírez, 2011)



**Figura 13. Esquema del aparato. Basado en (Mendoza Arce, et al, 2016)**

Su funcionamiento se basa en mantener una diferencia de temperatura sobre ambas caras del espécimen (Mendoza Arce, et.al, 2016) para posteriormente con la fórmula de Fourier pueda conocerse la conductividad térmica

Las cajas calientes presentan diversas ventajas para obtener datos precisos sobre el comportamiento térmico de los materiales. Entre sus ventajas se encuentra la mayor exactitud en las mediciones, debido a que el flujo de calor es directo hacia el espécimen, lo que permite una mejor caracterización de sus propiedades térmicas. Además, estas cajas permiten tener un control preciso de la temperatura, lo que garantiza condiciones estandarizadas para las pruebas.

Sin embargo, también presentan algunas desventajas. Una de ellas es la posibilidad de tener pérdidas de calor en la mitad y laterales de la caja, lo que podría afectar la precisión de las mediciones y generar variaciones en los resultados. Para minimizar estas pérdidas, es importante asegurar un buen aislamiento en las áreas de contacto con el exterior y adoptar medidas adicionales para mejorar la eficiencia térmica del sistema.

A pesar de estas limitaciones, las cajas calientes siguen siendo una herramienta útil y valiosa en la investigación y caracterización de materiales, ya que proporcionan información valiosa sobre sus propiedades térmicas y su comportamiento ante diferentes condiciones ambientales.

## Colorimetría

Las pruebas o análisis de colorimetría en morteros para la construcción buscan obtener información sobre el color y las características superficiales del material. Esto es fundamental para evaluar aspectos estéticos, arquitectónicos y funcionales de las estructuras construidas. Además del aspecto visual, el color de los morteros puede tener implicaciones en la absorción de calor y en la temperatura interior de los espacios habitables. Por ejemplo, los morteros de colores oscuros tienden a absorber más calor que los de colores claros, lo que puede influir en la sensación térmica y el consumo de energía para climatización. Aunque el color de los morteros puede modificarse con pintura, las características superficiales originales del material pueden seguir afectando la temperatura interior. Por lo tanto, conocer la colorimetría de los morteros y sus implicaciones térmicas es crucial para el diseño de edificaciones eficientes en términos energéticos y confort interior. Estas pruebas ayudan a validar o refutar hipótesis sobre la relación entre el color de los morteros, sus propiedades térmicas y el confort térmico en interiores, permitiendo ajustes en el diseño o selección de materiales para optimizar el rendimiento y cumplir con los estándares requeridos. El análisis de colorimetría en morteros para la construcción proporciona información valiosa para la estética y la eficiencia energética de las estructuras, contribuyendo al logro de los objetivos del proyecto y la validación de las hipótesis planteadas.

El sistema propuesto permitirá establecer una comparación objetiva y descripción de los colores de los materiales. Además, se utilizará para caracterizar y comparar materiales en función de su color. Dado que el color es un elemento estético importante en la arquitectura, es crucial emplear materiales que puedan adaptar sus propiedades de manera efectiva en relación con el color (Martínez, y otros, 2018). En el caso de los morteros de cal, tienden a tener una tonalidad más blanca que los morteros a base de cemento, pero esto también puede variar dependiendo de los agregados utilizados en la mezcla.

Una de las formas para medir la colorimetría es mediante la reflectancia, que se refiere a la capacidad de los materiales para reflejar la luz espectral. La Comisión Internacional de Iluminación desarrolló dos métodos para esta medición. El primero, en 1931, se basa en los valores de triestímulo ( $x$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), mientras que el segundo, desarrollado en 1976, se realiza a través de los espacios de color ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) (Martínez, y otros, 2018).



**Figura 14. Prueba de colorimetría. Foto: tomada por el autor.**



**Figura 15. Colorímetro. Foto: tomada por el autor.**

## Sostenibilidad

En la construcción es necesario aprovechar al máximo los materiales y elementos innovadores, Vitruvio desde el inicio de la arquitectura considero que los sistemas constructivos deben tener habitabilidad (utilitas), integridad (firmitas) y estética (venustas) y ahora se debe considerar la sostenibilidad como parte de la arquitectura (Monjo Carrió, 2005).

La sostenibilidad es la capacidad de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las de las futuras generaciones. En el contexto de la construcción, busca un desarrollo equitativo y duradero de los recursos ambientales, considerando enfoques sociales, económicos y ambientales. Para lograr un impacto positivo en el medio ambiente, se busca combatir el cambio climático y la escasez de recursos mediante la construcción de edificios eficientes. Esto incluye el uso de materiales con bajas emisiones de carbono y que proporcionan un confort térmico adecuado, contribuyendo así a un futuro más sostenible y responsable (Kumar, Alam, Zou, Sanjayan, & Memon, 2020).

El objetivo de la sostenibilidad es minimizar el impacto ambiental en el entorno y evitar el agotamiento de los recursos naturales, en el ámbito de la construcción es de vital importancia ya que se utilizan de diversos recursos naturales para los distintos sistemas constructivos, por lo que las tecnologías constructivas sostenibles y de confort han tomado gran importancia en parámetros en la construcción de

una vivienda que se pueda considerar habitable (Barajas, Castro, & De la Cruz, 2012).

Existen algunos aspectos que se deben considerar: la eficiencia energética mediante la implementación de tecnología y sistemas que sean más eficientes energéticamente como en el aislamiento térmico, sistemas de climatización e iluminación.

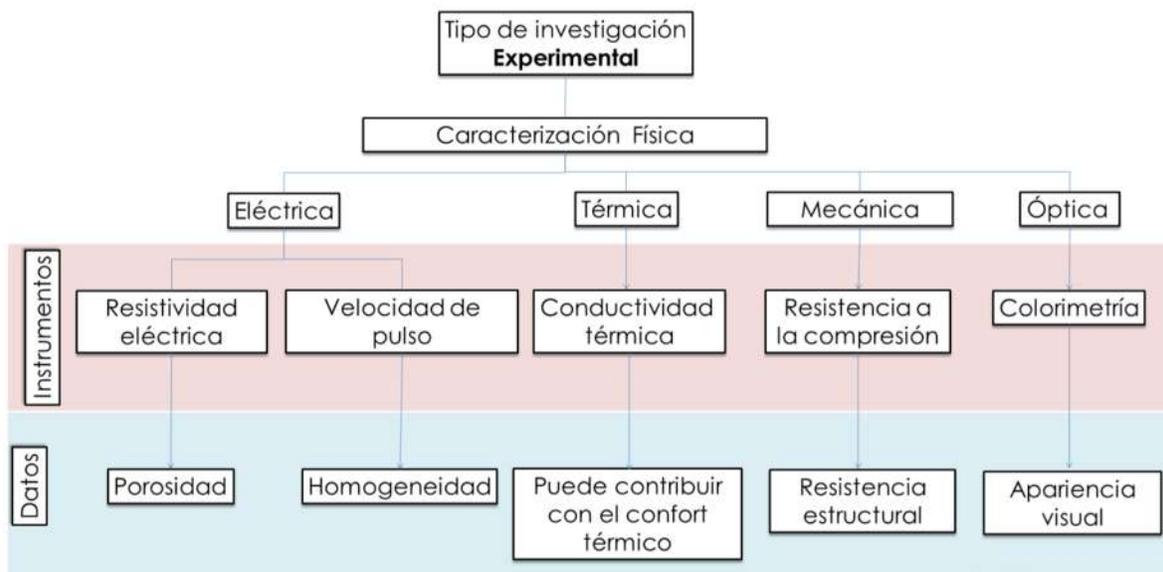
El uso de materiales sostenibles que sean reciclables, renovables de bajo impacto ambiental sobre todo el uso de materiales locales, también es importante el diseño bioclimático que es aprovechar las condiciones climáticas y el entorno para reducir el consumo energético y este puede ser también por medio de la selección de materiales para la construcción.

La producción de cemento es responsable de aproximadamente el 9% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Lizarazo Marriaga & Claisse, 2009). Además, en México, el sector comercial, habitacional y de servicios representa aproximadamente el 30% del consumo total de energía (Huelsz, Barrios, Rechtman, & Rojas) Estos datos resaltan el impacto significativo que los materiales de construcción tienen en el medio ambiente. Por lo tanto, es importante buscar enfoques de diseño bioclimático que minimicen los requerimientos de energía en los edificios y que sean sustentables.

Por lo que es fundamental el uso de materiales reciclados, es por ello que para esta investigación se utilizó PET (polietileno tereftalato) ya que puede contribuir al reciclar residuos del PET y con ello se reduce la cantidad de residuos plásticos en el mundo, se puede reducir el uso de arena que es un material no renovable y por ello se debe realizar más investigaciones sobre estos materiales y compararlos con lo que se usan de manera común.

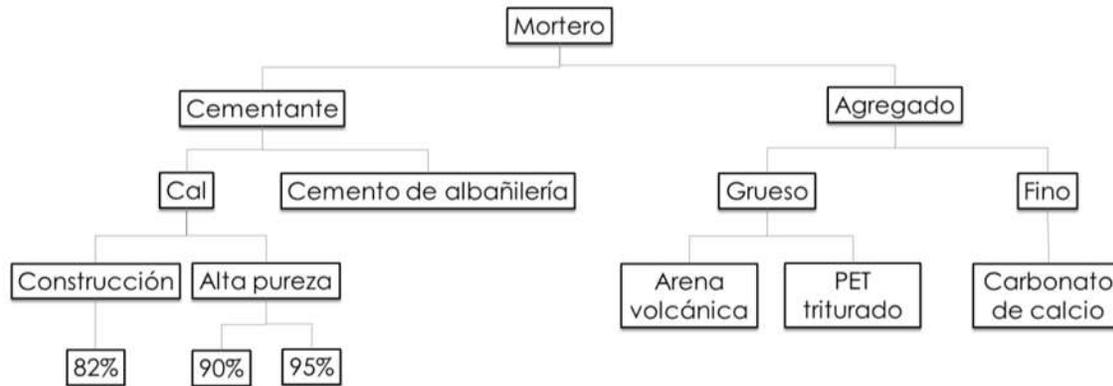
## Capitulo III. Metodología

En este capítulo, se detallan los métodos y procedimientos utilizados para llevar a cabo la presente investigación, cuyo objetivo es caracterizar las propiedades de morteros de cal elaborados con agregados locales, residuos sólidos plásticos y cal de distintos grados de pureza. La metodología adoptada es crucial para garantizar la precisión y validez de los resultados obtenidos, permitiendo una evaluación exhaustiva de las propiedades físicas, térmicas, eléctricas y mecánicas de los morteros estudiados.



**Gráfico. 2. Diseño metodológico**

Se describe primero la selección de los materiales utilizados en la investigación, incluyendo la cal de construcción, cal de alta pureza, cemento de albañilería y agregados como arena volcánica, PET y carbonato de calcio. La preparación de los especímenes, incluyendo las dosificaciones específicas y los procedimientos de mezcla, es detallada minuciosamente para asegurar la reproducibilidad de los experimentos.



**Gráfico. 3. Materiales utilizados en los morteros**

Asimismo, se presentan las características de los especímenes elaborados, proporcionando información sobre su tamaño y forma. Cada fase del proceso experimental, desde la elaboración de las mezclas hasta la realización de las pruebas de caracterización, es explicada en detalle para proporcionar una comprensión clara y completa del enfoque metodológico.

Finalmente, se discuten las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos, incluyendo dispositivos para medir la resistencia a la compresión, la conductividad térmica, la resistividad eléctrica y la colorimetría de los morteros.

## Materiales

Tomando en cuenta la sostenibilidad e industrialización de nuevos sistemas constructivos a partir de los materiales teniendo en cuenta la producción uso, ejecución y mantenimiento (Monjo Carrió, 2005), por lo que se consideró trabajar con la cal de construcción y cal de alta pureza de 90 y 95% por ser un material de baja densidad y el cemento de albañilería para tener una comparación ya que es el cementante que es el más usado para la construcción.

### Cal

La cal ha sido ampliamente utilizada como mortero de albañilería a lo largo de la historia, siendo un material tradicionalmente empleado hasta el siglo XX, cuando el cemento empezó a ganar popularidad en la industria de la construcción (Padovnik & Bokan-Bosiljkov, 2021).



Figura 16. Cal en polvo. Foto: tomada por el autor.

Es uno de los primeros cementantes utilizados por las antiguas civilizaciones. Se obtiene a través de la calcinación del carbonato de calcio, que se convierte en óxido de calcio (cal viva), el cual se hidrata para formar hidróxido de calcio. La presentación más común de la cal es en forma de polvo, que se adquiere en sacos de papel kraft de 25 kg (Navarro Mendoza & et al, 2020). Sin embargo, también es posible encontrarla en forma de pasta en el mercado.

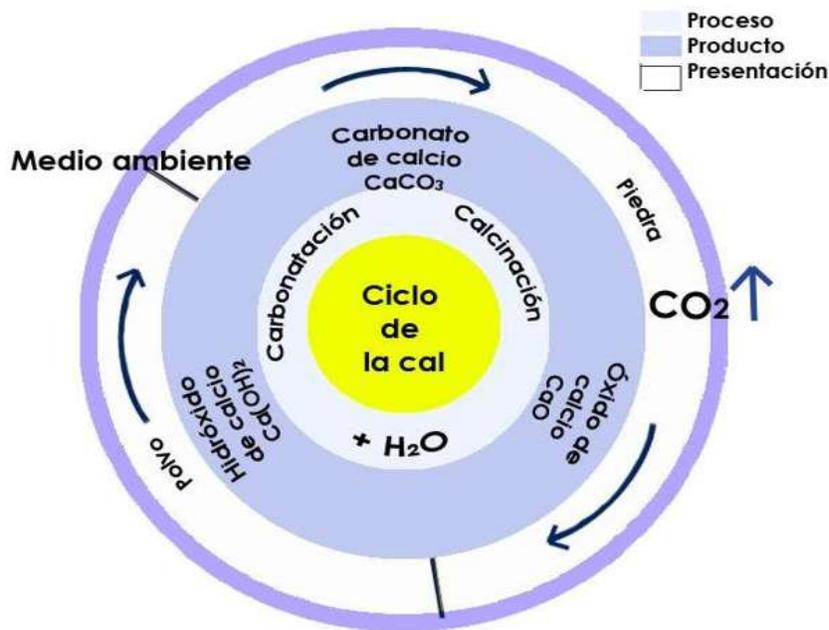


Figura 17. Ciclo de la cal (Navarro Mendoza E. G., 2019)

La cal se considera un material sustentable debido a que su fabricación requiere de menor temperatura de calcinación (Al-Jabri, Shoukry, Mokhtar, & Morsy, 2019) en comparación con el cemento, lo que resulta en un menor impacto ambiental.

Además, la cal tiene la ventaja de ser un material reciclable, lo que permite su reutilización en ciclos posteriores.

Con el avance de los procesos de producción de cal, se ha logrado mejorar su calidad y se han desarrollado diferentes tipos de cal para diversas aplicaciones. La Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFACAL) define cada uno de estos tipos de la siguiente manera (Navarro Mendoza, Alonso Guzmán, & Bedolla Arroyo, 2019):

- **Cal de construcción:** Se trata de hidróxido de cal con un contenido de hidróxidos entre el 75% y el 85%. Puede contener magnesio y su uso principal es en el ámbito de la construcción.
- **Cal química:** Es un hidróxido de calcio de alta concentración, con un contenido superior al 90%. Se utiliza en la construcción, la industria, el sector farmacéutico, entre otros.
- **Cal química de grado alimenticio:** Tiene una alta concentración de hidróxidos, pero cumple con normas específicas sobre el contenido de compuestos nocivos para la industria alimentaria y los niveles máximos de metales pesados permitidos.
- **Cal siderúrgica:** Consiste en óxido de calcio con un contenido del 90% y niveles bajos de azufre, fósforo y sílice. Es utilizada en la industria siderúrgica.
- **Cal agrícola:** A diferencia de las cales mencionadas anteriormente, esta se compone principalmente de carbonatos y se utiliza como mejorador de suelos agrícolas.

Estos diferentes tipos de cal permiten adaptar su uso a las necesidades específicas de cada aplicación.

Existen diferentes tipos de cales disponibles, cada una con características particulares que las hacen adecuadas para diversos trabajos en la industria de la construcción. Al seleccionar una cal, es importante considerar propiedades como la trabajabilidad, plasticidad y adherencia, las cuales se han encontrado que están relacionadas con el área superficial de la cal. A medida que el área superficial aumenta, se observa un mejor desempeño en estas propiedades.

**Tabla 3. Áreas superficiales de las cales. (Navarro Mendoza & et al, 2020)**

Tipo de cal	Área superficial
Cal de construcción	3.07 m <sup>2</sup> /gr
Cal de alta pureza 90%	11.67 m <sup>2</sup> /gr
Cal de alta pureza 95%	13.45 m <sup>2</sup> /gr
Cal de construcción macerada por 900 días	18.81 m <sup>2</sup> /gr

La Tabla muestra las áreas superficiales de diferentes tipos de cales, según el estudio realizado por Navarro Mendoza y colaboradores en 2020. La cal de construcción tiene un área superficial de 3.07 m<sup>2</sup>/gr, mientras que la cal de alta pureza 90% alcanza los 11.67 m<sup>2</sup>/gr y la cal de alta pureza 95% llega a los 13.45 m<sup>2</sup>/gr. Además, se menciona que la cal de construcción macerada durante 900 días puede incrementar su área superficial a 18.81 m<sup>2</sup>/gr, lo que indica un cambio en sus características con el tiempo.

Al comparar las cales de alta pureza con la cal de construcción, se pueden apreciar las diferencias en términos de su área superficial y, por ende, sus propiedades. Estos datos son relevantes para comprender las opciones disponibles y seleccionar la más adecuada para cada aplicación en el campo de la construcción.

En investigaciones realizadas, específicamente en el artículo titulado "Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration" (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023), se ha llevado a cabo una comparativa entre las cales de alta pureza y la cal de construcción. Los resultados arrojaron que la cal de construcción presenta mejores características en comparación con las cales de alta pureza. Estos hallazgos son relevantes para el uso de estos materiales en trabajos de restauración y construcción, destacando las ventajas de utilizar la cal de construcción debido a sus propiedades superiores en morteros analizados.

**Tabla 4. Caracterización de morteros de cal (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023)**

<b>Tipo de cal</b>	<b>Velocidad de pulso a 1400 días</b>	<b>Resistividad eléctrica</b>	<b>Resistencia a la compresión</b>
<b>Cal de construcción</b>	2605.91 m/s	3151.43 Ω·cm	46.604 kgf/cm <sup>2</sup>
<b>Cal con contenido de hidróxido de calcio 90</b>	2638.34 m/s	2656.91 Ω·cm	47.518 kgf/cm <sup>2</sup>
<b>Cal con contenido de hidróxido de calcio 95</b>	2096.09 m/s	142.88 Ω·cm	25.187 kgf/cm <sup>2</sup>

En los resultados obtenidos, se evidenció que la cal con contenido de hidróxido de calcio al 95% presentó menor resistencia mecánica, mayor porosidad y menor homogeneidad en comparación con las otras dos cales, a saber, la cal de construcción y la cal con contenido de hidróxido de calcio al 90%. Se observó que la cal de construcción y la cal con contenido de hidróxido de calcio al 90% mostraron resultados similares en cuanto a velocidad de pulso y resistencia mecánica. No obstante, la cal de construcción se destacó por tener una mayor resistividad eléctrica y, en consecuencia, una menor porosidad en su estado

endurecido, lo que sugiere que es el material con mejores características en esta etapa del estudio.

En esta investigación, se realizaron diversas mezclas utilizando la cal de construcción como cementante principal, y se consideraron también las cales con contenido de hidróxido de calcio más altos para realizar una comparativa, especialmente en términos de conductividad térmica, ya que la adición de cal puede mejorar la capacidad aislante y disminuir la inercia térmica (Zoma, Yonli, Malbila, Toguyeni, & Hassel, 2020). El objetivo de esta comparativa era evaluar cómo varían las propiedades térmicas de los morteros al emplear distintas calidades de cal como aglutinante. Al analizar la conductividad térmica de cada mezcla, se buscaba determinar cuál de ellas proporciona un mejor desempeño térmico, lo cual es fundamental para la construcción de edificios eficientes desde el punto de vista energético. Con estos datos, se espera obtener información relevante sobre cómo la calidad de la cal utilizada puede influir en el comportamiento térmico de los morteros, permitiendo así tomar decisiones informadas en futuros proyectos de construcción.

## Cemento de albañilería

El cemento es el producto más usado para la realización de morteros durante el siglo XX (Vejmelková, Keppert, Kersner, Rovnaníková, & Cerný, 2012), su creación en el siglo XIX dio paso a la nueva forma de edificar en el mundo, haciendo que el uso de la cal disminuyera



(Galván-Ruiz, Hernández, Baños, Noriega-Montes, & Rodríguez-García, 2009).

**Figura 18. Cemento de albañilería. Foto: tomada por el autor.**

El cemento de albañilería, también conocido como "mortero", es una mezcla de cemento Portland y minerales finamente molidos. Se utiliza principalmente para el pegado de piezas, aplanado de superficies, firmes y nivelación en trabajos de acabado en la construcción. Es importante destacar que no se recomienda su uso en estructuras de carga.

Según la ficha técnica del producto, el cemento de albañilería tiene un tiempo de fraguado inicial de 90 minutos y un tiempo de fraguado final de 1080 minutos.

Además, alcanza resistencias de 7.8 N/mm<sup>2</sup> (79.53 Kgf/cm<sup>2</sup>) a los 28 días de curado (CEMEX, 2023).

## Agregados

La presencia de agregados en las mezclas de mortero influye significativamente en sus propiedades mecánicas, físicas y durabilidad. Según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y el Instituto Mexicano del Transporte, los agregados representan aproximadamente el 60 al 75% del volumen total de la mezcla (Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2006). Es importante destacar que los agregados con forma angular tienden a tener un menor volumen de macroporos, mientras que los agregados basálticos tienden a presentar un mayor volumen de poros (Santos, Veiga, Silva, de Brito, & Álvarez, 2018). Estos factores deben ser considerados cuidadosamente durante el proceso de dosificación de los morteros para asegurar el logro de propiedades óptimas y una mayor durabilidad en la aplicación final.

Los agregados son partes importante de los morteros ya que al utilizar agregados livianos puede existir una reducción en la conductividad térmica y pero en algunos casos existe la disminución de las propiedades mecánicas (Longo, Lassandro, Moshiri, Phatak, Aiello, & Krakowiak, Lightweigth geopolymmer-based mortars for the structural and energy retrofit of buildings, 2020) y también la relación agua/aglutinante y el volumen influye en porosidad (Santos, Veiga, Silva, de Brito, & Álvarez, 2018) por lo que es necesario comprender las propiedades de cada uno de los posibles agregados y analizar sus beneficios para cada uno de sus usos, en este caso en los morteros para recubrir una edificación.

## Arena Volcánica

La arena utilizada en la elaboración de los morteros proviene de una cantera de Joyitas, ubicada cerca de Morelia, Michoacán, México. Este material fue sometido a un análisis detallado para evaluar sus características, en tabla 4 podemos observar la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) y en la tabla Y los datos están en las partes por millón (ppm) de diferentes elementos.

**Tabla 5 Fluorescencia de rayos X (XRF). Encontrado en (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023)**

FRX (%)	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LC	Total
	59.74	0.782	17.024	5.909	0.089	3.426	5.264	3.636	1.648	0.217	0.55	98.285

Tabla 6. Partes por millón (ppm) (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023)

ppm	Rb	Sr	BA	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	50	591	567	31	177	56	96	76	75	64	148	107	<3	9

El análisis de las arenas encontradas en los alrededores de Morelia indica que estas se clasifican como andesitas, basándose en la determinación de la sílice alcalina total (diagrama TAS). La composición química reveló que el porcentaje de SiO<sub>2</sub> es del 59.74% y la suma de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O es de 5.284 (Navarro Mendoza E. G., y otros, 2023). Estos valores son consistentes con los criterios de clasificación que se utilizan en el diagrama TAS para identificar la roca como una andesita. La presencia de sílice, sodio y potasio en las proporciones mencionadas es característica de este tipo de roca volcánica, lo que confirma la clasificación de las arenas encontradas como andesitas.

Estos datos fueron fundamentales para comprender cómo este tipo de arena puede influir en las propiedades de los morteros y su comportamiento térmico.



Figura 19. Arena Volcánica. Foto: tomada por el autor.



Figura 20. Finos en la arena volcánica. Foto: tomada por el autor.

### PET ( tereftalato de polietileno)

Actualmente uno de los puntos de la sostenibilidad es el de recuperar o reciclar materiales (Monjo Carrió, 2005), en el ámbito de la construcción el PET es una buena opción ya que es de unos lo plásticos más comunes, siendo un material no biodegradable (Borg, Baldacchino, & Ferrara, 2016)

A partir de mediados de los años 70, la producción de botellas de refresco hechas de PET ha experimentado un crecimiento constante. Este material se caracteriza por ser ligero, resistente y tener una baja permeabilidad, especialmente al CO<sub>2</sub> (Reis & Carneiro, 2011). Además, su transparencia y superficie lisa le otorgan una estética ideal para los productos envasados. En el 2017 el PET ha tenido un aumento mundial cerca de 27,8 millones de toneladas (Spósito, y otros, 2020).



**Figura 21. Envases de PET. Foto: tomada por el autor.**

El reciclaje de PET se enmarca dentro de lo que se conoce como "reciclado de materiales". Este proceso implica la recolección, trituración y desintegración de materiales de desecho para re-introducirlos en el ciclo productivo. Durante varios años, se han llevado a cabo investigaciones sobre la utilización de estos plásticos como una alternativa para reemplazar materiales naturales, como es el caso de la arena volcánica. Estos estudios buscan aprovechar el potencial del PET reciclado y explorar su viabilidad como sustituto en diversas aplicaciones (Reis & Carneiro, 2011).

De acuerdo al código de Edificación de Vivienda (SEDATU, 2017) los materiales reciclados para el uso en la construcción debe ser un producto que se considere desechos al menos en una ocasión, al manejarse y los usuarios finales deben ser seguros, dentro de esto está el PET que es material triturados de botellas de distintos productos para consumo humano. Existen investigaciones donde la adición del fibras de PET en el concreto tiene mejoras interesantes (Borg, Baldacchino, & Ferrara, 2016),

El rendimiento del PET en las mezclas está influenciado por la calidad, forma, cantidad y dimensiones del agregado utilizado. Las fibras de PET onduladas y rectas mejoraron la resistencia a la contracción y ayudaron a prevenir un mayor

agrietamiento (Borg, Baldacchino, & Ferrara, 2016). En el caso de la investigación en cuestión, se utilizaron escamas de PET.



**Figura 22. Granulometría del PET. Foto: tomada por el autor.**



**Figura 23. PET triturado. Foto: tomada por el autor.**

### **Carbonato de calcio**

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se utiliza como agregado fino para mejorar las propiedades de los morteros de cal. Este producto se presenta en forma de polvo sólido, no es inflamable y es químicamente muy estable, con un pH entre 8.5 y 9.4 (Calidra, 2021) Por lo tanto, es una excelente opción como agregado en los morteros.

Se busca mejorar la permeabilidad y porosidad de los morteros de cal mediante la adición de carbonato de calcio como agregado fino. Esto tiene como objetivo evitar el paso del agua a través de la red de poros del mortero. La permeabilidad puede dar lugar a la acumulación de sales, lo que a su vez puede ocasionar la formación de fisuras y una mayor desintegración del mortero (Nogueira , Ferreira Pinto, & Gomes, 2020). Por lo tanto, al incorporar carbonato de calcio como agregado fino, se puede mejorar la granulometría y las características de los morteros de cal, reduciendo su permeabilidad y aumentando su resistencia a la formación de fisuras y la desintegración.



**Figura 24.** Carbonato de calcio en polvo. Foto: tomada por el autor.



**Figura 25.** Cal, carbonato de calcio y PET. Foto: tomada por el autor

## Preparación de los especímenes (mezclas)

En esta investigación, se asignaron identificadores a los diferentes tipos de morteros con el fin de facilitar su identificación en el texto. Estas claves permiten hacer referencia de manera más sencilla a cada una de las mezclas de mortero analizadas, lo que facilita la comprensión y la comunicación de los resultados obtenidos. Esto garantiza una mayor claridad y coherencia en la presentación de los resultados y contribuye a una mejor comprensión general del trabajo realizado.

Tabla 7. Claves de los morteros.

Morteros	
Clave	Cementante
CA	Cemento de albañilería
CC	Cal de construcción
CAP90	Cal con contenido de hidróxido con 90 %
CAP95	Cal con contenido de hidróxido con 95 %
CC-CC	Cal de construcción
CC-P	Cal de construcción
CC-P-CC	Cal de construcción

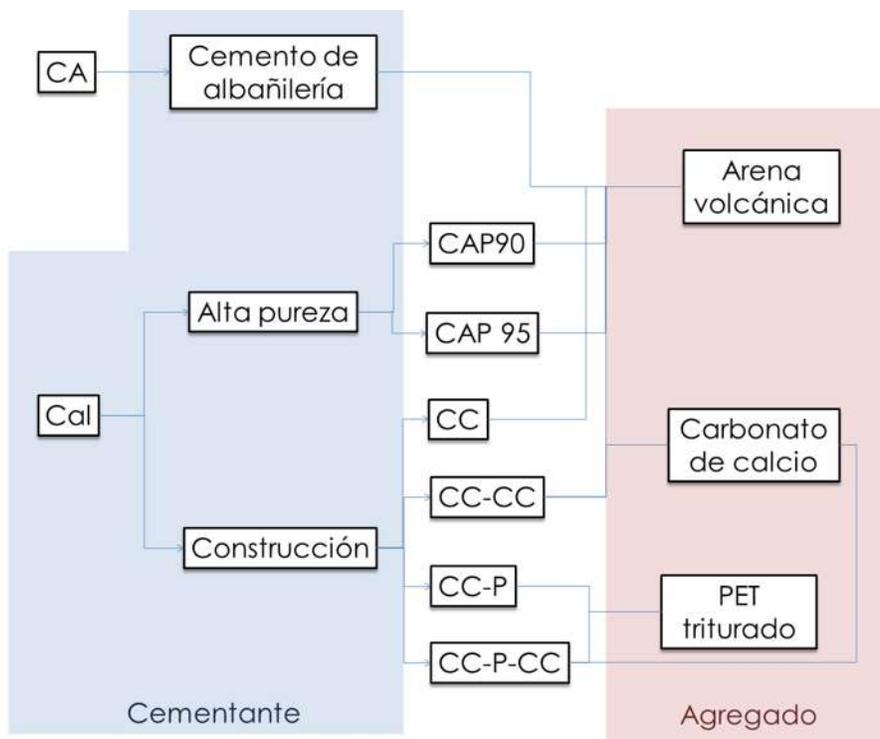


Gráfico. 4. Morteros utilizados

## Dosificación

Es importante lograr una dosificación equilibrada en los morteros, ya que un exceso de cemento puede mejorar las propiedades mecánicas, pero también aumenta la retracción y, por ende, el riesgo de fisuras. Por otro lado, un exceso de cal puede reducir la retracción, pero puede resultar en una mayor desintegración del mortero a lo largo del tiempo. Es importante tener en cuenta que un exceso de cementante puede acortar la vida útil del mortero (Santos W, y otros, 2019). Es fundamental encontrar un balance adecuado entre los componentes para garantizar tanto la resistencia mecánica como la durabilidad del mortero.

**Tabla 8. Dosificación de los morteros.**

Clave	Cementante	Agregado	Agregado fino	Proporción en volumen
CA	Cemento de albañilería	Arena volcánica	-----	2:4
CC	Cal de construcción	Arena volcánica	-----	2:4
CAP90	Cal con contenido de hidróxido con 90 %	Arena volcánica	-----	2:4
CAP95	Cal con contenido de hidróxido con 95 %	Arena volcánica	-----	2:4
CC-CC	Cal de construcción	Arena volcánica	Carbonato de calcio	2:4:1
CC-P	Cal de construcción	PET	-----	2.5:4
CC-P-CC	Cal de construcción	PET	Carbonato de calcio	2:4:1

Se realizó una revisión de la dosificación de los agregados en las mezclas, tomando en cuenta las recomendaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que establecen que los agregados deben representar entre el 60% y el 75% del volumen total de la mezcla (Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2006). Con base en estas directrices, se elaboró la siguiente tabla que resume los morteros estudiados en este documento.

**Tabla 9. Porcentaje de cementante- agregado.**

	Cementante	Agregado
CC	34%	66%
CAP90	34%	66%
CAP95	34%	66%
CA	34%	66%
CC-CC	29%	71%
CC-P	38%	62%
CC-P-CC	29%	71%



Figura 26 Cal y arena volcánica. Foto: tomada por el autor.



Figura 27. Mezcla en seco de cal, carbonato de calcio y PET.. Foto: tomada por el autor.

## Características de los especímenes

Para realizar las pruebas físicas, se prepararon cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm y cilindros de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura. La elaboración de los especímenes siguió la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010 para morteros de cemento, ya que no existen normas específicas para morteros de cal.



**Figura 28. Mezcla en seco de cal y arena volcánica. Foto: tomada por el autor.**



**Figura 29. Mezcla de cal y arena volcánica. Foto: tomada por el autor.**

El proceso de elaboración de los cubos fue el siguiente:

1. Se aplicó lubricante en todas las caras de los moldes.
2. Se llenó el molde en dos capas, golpeando cada capa 32 veces con un pisón de acrílico.
3. Después de cada capa, se golpeó el molde cinco veces sobre la superficie de trabajo para eliminar el exceso de aire.
4. Se niveló la superficie con una espátula.

En cuanto a los cilindros, el proceso fue el siguiente:

1. Se aplicó lubricante en los moldes.
2. La mezcla se dividió en dos partes y se golpeó cada una de ellas 25 veces con una varilla para eliminar el aire.
3. Se enrasaron los moldes para quitar el exceso de material y nivelar la superficie.



**Figura 30. Especímenes en moldes. Foto: tomada por el autor.**

Debido al fraguado más lento de la cal en comparación con otros cementantes, como el cemento, no fue posible desmoldar los especímenes después de 24 horas. Por esta razón, se dejaron en los moldes durante 7 días antes de desmoldarlos, con el fin de evitar daños durante la manipulación y prevenir cualquier deterioro.



**Figura 31. Desmolde de especímenes. Foto: tomada por el autor.**

### **Especímenes cúbicos**

Se elaboró una cantidad específica de especímenes cúbicos para cada tipo de mortero: 9 para CAP90, 9 para CAP95 (sin embargo, uno de ellos, 3B, se rompió durante el proceso de desmoldado), 9 para CC, 12 para CC-CC, 6 para CC-P-CC y CC-P, y 12 para CA.



Figura 32. Mortero de cal de construcción - arena volcánica.

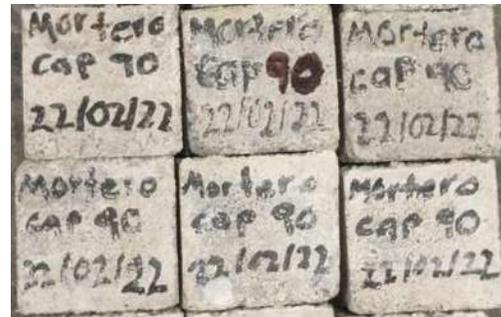


Figura 33. Mortero de cal con contenido de hidróxido de calcio 90 - arena volcánica.



Figura 34. Mortero de cal con contenido de hidróxido de calcio 95 - arena volcánica.



Figura 35. Mortero de cal de construcción - arena volcánica - carbonato de calcio.

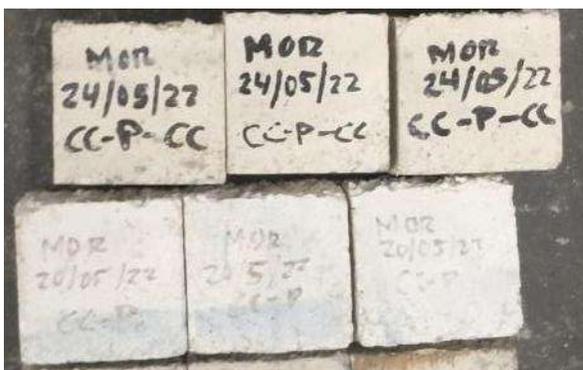


Figura 36. Mortero de cal de construcción - PET y cal de construcción - PET - carbonato de calcio.



Figura 37. Mortero de cemento de albañilería.

Los especímenes cúbicos de cal experimentaron escasa contracción a medida que el agua se evaporaba, lo que provocó cambios en sus dimensiones.



Figura 38. Morteros en estado endurecido.  
Foto: tomada por el autor.



Figura 39. Vista de dimensiones de los cubos de los morteros. Foto: tomada por el autor.

En la siguiente tabla se muestran las medidas, pesos y densidad promedio de cada cubo.

Tabla 10. Dimensiones de los cubos CC (resultados promedio)

Cal	CLAVE	Peso en gramos	Medida en centímetros			cm <sup>3</sup>	densidad	d
			a	b	c			
CC	1A	213.6	5.02	5.10	5.02	128.52	1.66	g/cm <sup>3</sup>
	2A	207.6	5.06	5.04	5.06	129.04	1.61	g/cm <sup>3</sup>
	3A	205.2	5.00	5.01	5.00	125.25	1.64	g/cm <sup>3</sup>
	1B	223.4	5.22	5.12	5.18	138.44	1.61	g/cm <sup>3</sup>
	2B	215.8	5.30	5.08	5.22	140.54	1.54	g/cm <sup>3</sup>
	3B	221.4	5.30	5.10	5.24	141.64	1.56	g/cm <sup>3</sup>
	1C	211.4	5.02	5.12	5.08	130.57	1.62	g/cm <sup>3</sup>
	2C	207.4	5.10	5.12	5.10	133.17	1.56	g/cm <sup>3</sup>
	3C	209.4	5.08	5.06	5.10	131.09	1.60	g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 11. Dimensiones de los cubos CAP90 (resultados promedio)**

C al	CLAV E	Peso en gramos	Medida en centímetros			cm <sup>3</sup>	densida d		
			a	b	c				
C AP 90	1A	217.8	5.16	5.12	5.12	135.27	1.61	g/cm <sup>3</sup>	
	2A	221.6	5.12	5.14	5.16	135.79	1.63	g/cm <sup>3</sup>	
	3A	231.6	5.14	5.08	5.46	142.57	1.62	g/cm <sup>3</sup>	
	1B	226.2	5.20	5.08	5.18	136.83	1.65	g/cm <sup>3</sup>	
	2B	217	5.14	5.00	5.20	133.64	1.62	g/cm <sup>3</sup>	
	3B	220.2	5.18	5.06	5.12	134.20	1.64	g/cm <sup>3</sup>	
	1C	223.8	5.14	5.02	5.18	133.66	1.67	g/cm <sup>3</sup>	
	2C	225.6	5.14	5.12	5.16	135.79	1.66	g/cm <sup>3</sup>	
	3C	218.4	5.22	5.08	5.24	138.95	1.57	g/cm <sup>3</sup>	

**Tabla 12. Dimensiones de los cubos CAP95 (resultados promedio)**

C al	CLAV E	Peso gramos	Medida en centímetros			cm <sup>3</sup>	densida d		
			a	b	c				
C AP 95	1A	218	5.10	5.09	5.11	132.65	1.64	g/cm <sup>3</sup>	
	2A	209	5.2	5.1	5.2	137.90	1.52	g/cm <sup>3</sup>	
	3A	210.3	5.10	5.08	5.10	132.13	1.59	g/cm <sup>3</sup>	
	1B	207.5	5.21	5.05	5.19	136.55	1.52	g/cm <sup>3</sup>	
	2B	212.6	5.31	5.05	5.26	141.05	1.51	g/cm <sup>3</sup>	
	3B	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
	1C	200.9	5.09	5.08	5.09	131.61	1.53	g/cm <sup>3</sup>	
	2C	197.2	5.01	4.99	5.00	125.00	1.58	g/cm <sup>3</sup>	
	3C	198	5.08	5.02	5.05	128.78	1.54	g/cm <sup>3</sup>	
	1D	200.2	5.08	5.05	5.00	128.27	1.56	g/cm <sup>3</sup>	
	2D	197.9	5.08	5.09	5.05	130.58	1.52	g/cm <sup>3</sup>	
	3D	210	5.20	5.15	5.19	138.99	1.51	g/cm <sup>3</sup>	

**Tabla 13. Dimensiones de los cubos CC-P (resultados promedio)**

Cal	CLAVE	Peso en gramos	Medida en centímetros			cm <sup>3</sup>	densidad	
			a	b	c		d	
CC-P	1A	125.3	5.14	5.28	5.06	137.32	0.91	g/cm <sup>3</sup>
	2A	124.1	5.16	5.27	5.13	139.50	0.89	g/cm <sup>3</sup>
	3A	119.6	5.04	5.20	5.08	133.14	0.90	g/cm <sup>3</sup>
	1B	123.3	5.11	5.16	5.09	134.21	0.92	g/cm <sup>3</sup>
	2B	123.1	5.10	5.18	4.94	130.50	0.94	g/cm <sup>3</sup>
	3B	122.8	5.24	5.14	5.04	135.75	0.90	g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 14. Dimensiones de los cubos CC-CC (resultados promedio)**

Cal	CLAVE	Peso en gramos	Medida en centímetros			cm <sup>3</sup>	densidad	
			a	b	c		d	
CC-CC	1A	229.44	4.38	5.12	4.75	106.52	2.15	g/cm <sup>3</sup>
	2A	216.75	4.82	4.87	4.85	113.85	1.90	g/cm <sup>3</sup>
	3A	214.27	4.73	4.71	4.75	105.82	2.02	g/cm <sup>3</sup>
	1B	219.26	4.87	4.98	4.86	117.87	1.86	g/cm <sup>3</sup>
	2B	218.72	4.87	4.75	4.91	113.58	1.93	g/cm <sup>3</sup>
	3B	221.06	4.82	4.88	4.85	114.08	1.94	g/cm <sup>3</sup>
	1C	227.47	5.02	4.82	5.02	121.47	1.87	g/cm <sup>3</sup>
	2C	226.74	4.98	4.86	5.00	121.01	1.87	g/cm <sup>3</sup>
	3C	231.42	5.02	4.82	5.01	121.22	1.91	g/cm <sup>3</sup>
	1D	231.43	5.00	4.96	4.98	123.50	1.87	g/cm <sup>3</sup>
	2D	234.56	5.12	5.02	5.00	128.51	1.83	g/cm <sup>3</sup>
	3D	230.25	5.02	4.96	5.02	124.99	1.84	g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 15. Dimensiones de los cubos CC-P-CC (resultados promedio)**

Cal	CLAVE	peso	medida			cm <sup>3</sup>	densidad	
			a	b	c			
CC-P-CC	1A	141.2	5.12	5.00	5.08	130.05	1.09	g/cm <sup>3</sup>
	2A	140.6	5.02	4.98	5.1	127.50	1.10	g/cm <sup>3</sup>
	3A	140.6	5.2	5.00	5.18	134.68	1.04	g/cm <sup>3</sup>
	1B	137.8	5.02	5.00	5.00	125.50	1.10	g/cm <sup>3</sup>
	2B	140.6	5.12	5.00	5.12	131.07	1.07	g/cm <sup>3</sup>
	3B	138.4	5.12	4.98	5.02	128.00	1.08	g/cm <sup>3</sup>

**Tabla 16. Dimensiones de los cubos CA (resultados promedio)**

Cal	CLAVE	peso	medida			cm <sup>3</sup>	densidad	
			a	b	c			
CA	1A	227.9	5.08	5.09	5.08	131.35	1.73	g/cm <sup>3</sup>
	2A	228.4	5.05	5.12	5.02	129.80	1.76	g/cm <sup>3</sup>
	3A	230	5.11	5.10	5.15	134.21	1.71	g/cm <sup>3</sup>
	1B	229.1	5.11	5.09	5.09	132.39	1.73	g/cm <sup>3</sup>
	2B	227.8	5.11	5.10	5.21	135.78	1.68	g/cm <sup>3</sup>
	3B	239.1	5.25	5.13	5.21	140.32	1.70	g/cm <sup>3</sup>
	1C	237.7	5.10	5.09	5.10	132.39	1.80	g/cm <sup>3</sup>
	2C	234.6	5.11	5.11	5.11	133.43	1.76	g/cm <sup>3</sup>
	3C	245.4	5.19	5.11	5.2	137.91	1.78	g/cm <sup>3</sup>
	1D	244.8	5.19	5.10	5.28	139.76	1.75	g/cm <sup>3</sup>
	2D	242.6	5.20	5.11	5.26	139.77	1.74	g/cm <sup>3</sup>
	3D	241.2	5.29	5.22	5.29	146.08	1.65	g/cm <sup>3</sup>

## Especímenes Cilíndricos

Se realizaron con la misma mezcla de los especímenes cúbicos, en molde de 10 centímetros de alto y 5 centímetros de diámetro, se probaron 3 cilindros de cada mezcla para las pruebas térmicas.



Figura 40. Cilindro de mortero de cal de construcción-arena volcánica.



Figura 41. Cilindro de mortero de cal alta pureza 90%-arena volcánica.



Figura 42. Cilindro de mortero de cal alta pureza 95%-arena volcánica.



Figura 43. Cilindro de mortero de cal de construcción-PET.

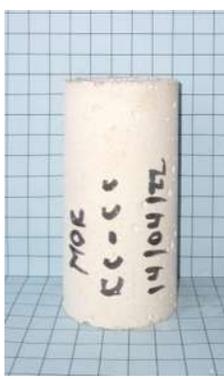


Figura 44. Cilindro de mortero de cal de construcción-arena volcánica- carbonato de calcio



Figura 45. Cilindro de mortero de cal de construcción-PET- carbonato de calcio



**Figura 46. Cilindro de mortero de cemento de albañilería-arena volcánica.**

Para los cilindros que se utilizaron para medir la conductividad térmica se utilizaron tres especímenes de cada mortero, tenemos los siguientes datos:

**Tabla 17. Dimensiones de los cilindros CC (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen cm <sup>3</sup>	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CC	I	313.1	9.8	4.9	2.45	18.9	184.8	1.69
	II	334.8	9.9	5.1	2.53	20.0	198.3	1.69
	III	317.5	9.94	4.92	2.46	19.0	189.0	1.68

**Tabla 18. Dimensiones de los cilindros CAP90 (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen cm <sup>3</sup>	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CAP90	I	319.8	9.8	5.0	2.48	19.2	188.6	1.70
	II	320.6	9.9	4.9	2.45	18.9	186.5	1.72
	III	329.2	9.87	5.02	2.51	19.8	195.4	1.69

**Tabla 19. Dimensiones de los cilindros CAP95 (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CAP95	I	311.3	9.9	5.0	2.50	19.6	194.4	1.60
	II	326.4	10.1	5.1	2.55	20.4	205.3	1.59
	III	312.0	10.14	5.10	2.55	20.4	207.1	1.51

**Tabla 20. Dimensiones de los cilindros CC-P (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CC-P	I	184.0	9.9	5.0	2.50	19.6	194.4	0.95
	II	177.6	9.9	4.9	2.47	19.1	189.7	0.94
	III	197.6	10.09	5.12	2.56	20.6	207.7	0.95

**Tabla 21. Dimensiones de los cilindros CC-CC (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CC-CC	I	332.6	9.9	5.1	2.54	20.3	201.5	1.65
	II	323.6	10.0	4.9	2.45	18.9	188.0	1.72
	III	329.6	9.88	4.95	2.48	19.2	190.1	1.73

**Tabla 22. Dimensiones de los cilindros CC-P-CC (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen cm <sup>3</sup>	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CC-P-CC	I	197.8	9.7	4.9	2.43	18.6	179.9	1.10
	II	204.4	9.7	5.0	2.48	19.2	187.4	1.09
	III	201.1	9.74	4.89	2.45	18.8	182.9	1.10

**Tabla 23. Dimensiones de los cilindros CA (resultados promedio)**

Tipo	No	peso en gramos	Medidas en centímetros				Volumen cm <sup>3</sup>	densidad gr/cm <sup>3</sup>
			alto	diámetro	radio	área		
CA	I	359.3	10.5	5.0	2.50	19.6	206.2	1.74
	II	351.1	10.0	5.2	2.60	21.2	211.7	1.66
	III	348.9	9.94	5.04	2.52	20.0	198.3	1.76

La interpretación de los resultados expresados en las tablas de pesos, medidas y densidad proporciona una visión integral de las características físicas de los materiales empleados en los morteros. Los datos de pesos son fundamentales para establecer la proporción precisa de cada componente en la mezcla, lo que

incide directamente en las propiedades y calidad del mortero final. Por otro lado, las medidas registradas, como las dimensiones de los moldes utilizados para la fabricación de especímenes de mortero, garantizan la precisión y reproducibilidad de los resultados.

Además, la densidad, como indicador de la compacidad y masa por unidad de volumen de los morteros, ofrece información valiosa sobre su resistencia, durabilidad y capacidad para soportar cargas externas. Esta última también es crucial para evaluar la eficacia del mortero en términos de aislamiento térmico y acústico.

La interpretación conjunta de estos datos permite comprender la composición, calidad y propiedades físicas de los morteros, aspectos fundamentales para asegurar su idoneidad y eficacia en diversas aplicaciones de construcción.

### **Preparación de muestras para las pruebas de resistividad eléctrica**

Para realizar la prueba, es fundamental que los especímenes estén saturados. Sin embargo, los morteros de cal no pueden sumergirse directamente en agua debido a su tendencia a disgregarse. Por lo tanto, se utilizó un método de hidratación lenta. Consistió en colocar los cubos en un molde con tapa, agregando agua de manera que no cubriera completamente el espécimen (ver imagen adjunta). Cada cubo fue pesado cada tercer día hasta que alcanzara un peso constante. Este proceso de hidratación tomó un total de siete semanas.



**Figura 47. Preparado para saturación. Foto: tomada por el autor**



**Figura 48. Cubos en saturación. Foto: tomada por el auto**

## Equipos para la caracterización física

Se tiene como objetivo llevar a cabo pruebas físicas en los cubos de morteros de cal, que incluyen la resistividad eléctrica, velocidad de pulso, y resistencia mecánica. Por otro lado, la medición de la conductividad térmica se realizó en los cilindros. Para realizar la experimentación se utilizaron los siguientes equipos.

### Resistividad eléctrica

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales del ingeniero Luis Silva Ruelas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, utilizando el Resistómetro marca NILSSON ELECTRICAL LABORATORY INC., modelo 400, con número de serie N-4-9932.



**Figura 49. NILSSON ELECTRICAL LABORATORY INC. . Foto: tomada por el autor.**

El método utilizado en esta investigación fue el método uniaxial, que consiste en utilizar dos puntos de medición para los volúmenes de las muestras. La muestra se coloca entre dos electrodos que son placas de metal, y se coloca una esponja o trapo húmedo para mantener un ambiente adecuado. Luego, se aplica una corriente directa y se mide la caída de potencial a través de la muestra. (Cosoli, Mobili, Tittarelli, Revel, & Chiariotti, 2020).



Figura 50. Prueba de resistividad eléctrica. Foto: tomada por el autor

## Velocidad de pulso ultrasónico

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de materiales del ingeniero Luis Silva Ruelas, ubicado en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Para llevar a cabo la prueba, se utilizó el equipo V-Meter MKIV de la marca JAMES INSTRUMENTS.



Figura 51. Equipo V-Meter MKIV. Foto: tomada por el autor



Figura 52. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico. Foto: tomada por el autor.

Consta de dos transmisores electroacústicos que miden el tiempo de propagación el impulso ultrasónico de un transmisor al otro, entre el transmisor se coloca gel para que exista un mejor contacto.

## Conductividad térmica

Para esta investigación, se empleó el equipo KD2 Pro para medir la conductividad térmica de los morteros. Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Colima, utilizando el dispositivo portátil KD2 Pro. Este equipo permite realizar mediciones utilizando dos métodos: el de aguja simple y la sonda doble. En el caso de la prueba de los morteros, se utilizó el método de aguja simple, el cual se basa en la norma ASTM D 534-08 "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure". La prueba consiste en que un filamento calefactor pasa una corriente constante a través de una aguja hipodérmica que contiene el filamento, y esta sonda controla y registra la variación de temperatura en régimen estacionario (Nope Gómez & De Santiago, 2014).



Figura 53. Equipo KD2 Pro. Foto: tomada por el autor.



Figura 54. Prueba de conductividad térmica. Foto: tomada por el autor.

Para que las pruebas sean fiables se debe considerar la variación que el aparato pueda tener, en este caso es  $0.409 \pm 10\% \text{ K(Wm}^{-1} \text{ K}^{-1})$  según el instructivo del aparato (figura ) y se verifica con cuando se realiza la prueba, en este caso el resultado fue  $0.390 \text{ w/m} \cdot \text{K}$ .





**Figura 58. Prensa eléctrica digital Modelo E659-2. Foto: tomada por ael autor.**



**Figura 59. Prueba de resistencia a la compresión. Foto: tomada por el autor.**

## Colorimetría

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales del ingeniero Luis Silva Ruelas en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El equipo que se utilizó para realizar la medición del análisis colorimétrico fue CRLM-200, este se basa en el sistema estandarizado por la CIE (International Commission on Illumination) en 1931 (Berns, 2019), este toma una medida a través del espectrofotómetro emitiendo una luz en la superficie de los especímenes leyendo la respuesta a partir de la luminosidad ( $L^*$ ) y los parámetros  $a^*$  (positivo rojo),  $-a^*$  (negativo verde),  $b^*$  (positivo amarillo) y  $-b^*$  (negativo azul) (Martínez, y otros, 2018).

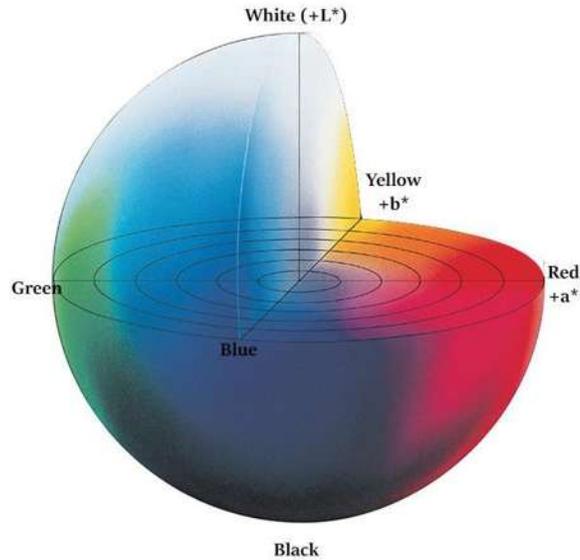


Figura 60. Espacio de color CIE (Konica Minolta, 2023)

Los colores acromáticos están alrededor del centro y hacia el exterior aumenta la saturación del color (Konica Minolta, 2023).

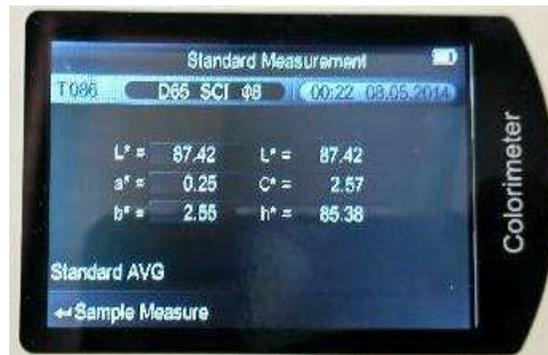


Figura 61. Valores del color en las muestras.

## Capítulo IV. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de las diversas pruebas y análisis realizados en el marco de esta investigación doctoral. Estos resultados son el producto de un riguroso proceso de recolección de datos, experimentación y análisis, destinado a abordar las interrogantes planteadas y a contribuir al conocimiento en el área de morteros para la construcción. Las pruebas realizadas incluyen resistividad eléctrica, velocidad de pulso, resistencia mecánica, propiedades térmicas y colorimetría, las cuales han sido diseñadas para explorar diferentes aspectos de los morteros utilizados en la construcción.

Cada uno de los análisis llevados a cabo ha sido guiado por los objetivos específicos de la investigación, buscando arrojar luz sobre aspectos clave relacionados con la calidad, eficiencia y desempeño de los morteros en contextos constructivos. Asimismo, se han considerado las hipótesis planteadas en el inicio de este estudio, y se espera que los resultados aquí presentados contribuyan a su validación o refutación, así como al enriquecimiento del debate académico en el campo de estudio.

Es importante destacar que los datos presentados en este capítulo representan un paso significativo en el avance del conocimiento en esta área específica, y ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el ámbito de la construcción y los materiales de construcción.

A continuación se detallan los resultados obtenidos, los cuales se presentan de manera sistemática y estructurada para facilitar su comprensión y análisis.

## **Resistividad eléctrica, $R_E$**

Los resultados obtenidos brindan información sobre la cantidad de poros presentes en los morteros. A mayor resultado, menor será la porosidad del material y, por lo tanto, será menos susceptible al deterioro. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes utiliza una tabla de evaluación que establece los criterios para determinar el grado de porosidad en los morteros.

**Tabla 24. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2006)**

Resistividad del concreto ( $\rho$ ) k $\Omega$ .cm	Pronóstico de Corrosión
$\rho > 200$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo moderado
$\rho > 10$	Alto riesgo

Mediante el uso de esta tabla, se puede evaluar el nivel de porosidad de los morteros analizados en esta investigación, los cuales arrojaron los siguientes resultados:

**Tabla 25. Resistividad eléctrica CC (resultados promedios)**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC	1A	575 $\Omega$ /m	<b>381.7 <math>\Omega</math>/m</b>
	2A	310 $\Omega$ /m	
	3A	475 $\Omega$ /m	
	1B	320 $\Omega$ /m	
	2B	260 $\Omega$ /m	
	3B	350 $\Omega$ /m	

**Tabla 26. Resistividad eléctrica CAP 90 (resultados promedios)**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CAP90	1A	450 $\Omega$ /m	<b>450.0 <math>\Omega</math>/m</b>
	2A	460 $\Omega$ /m	
	3A	540 $\Omega$ /m	
	1B	380 $\Omega$ /m	
	2B	480 $\Omega$ /m	
	3B	420 $\Omega$ /m	

Tabla 27. Resistividad eléctrica CAP95 (resultados promedios)

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CAP95	1A	340 $\Omega$ /m	352.2 $\Omega$ /m
	2A	370 $\Omega$ /m	
	1B	315 $\Omega$ /m	
	2B	300 $\Omega$ /m	
	3B	430 $\Omega$ /m	
	1C	330 $\Omega$ /m	
	2C	410 $\Omega$ /m	
	3C	320 $\Omega$ /m	

Tabla 28. Resistividad eléctrica CC-P (resultados promedios)

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-P	1A	85 $\Omega$ /m	93.3 $\Omega$ /m
	2A	105 $\Omega$ /m	
	3A	90 $\Omega$ /m	

Tabla 29. Resistividad eléctrica CC-CC (resultados promedios)

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-CC	1A	340 $\Omega$ /m	311.1 $\Omega$ /m
	2A	260 $\Omega$ /m	
	3A	290 $\Omega$ /m	
	1B	330 $\Omega$ /m	
	2B	295 $\Omega$ /m	
	3B	385 $\Omega$ /m	
	1C	260 $\Omega$ /m	
	2C	380 $\Omega$ /m	
	3C	250 $\Omega$ /m	

Tabla 30. Resistividad eléctrica CC-P-CC (resultados promedios)

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-P-CC	1A	260 $\Omega$ /m	210.0 $\Omega$ /m
	2A	220 $\Omega$ /m	
	3A	150 $\Omega$ /m	

Tabla 31. Resistividad eléctrica CA. (resultados promedios)

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CA	1A	1100 $\Omega/m$	1144.4 $\Omega/m$
	2A	1100 $\Omega/m$	
	3A	1100 $\Omega/m$	
	1B	2100 $\Omega/m$	
	2B	1000 $\Omega/m$	
	3B	900 $\Omega/m$	
	1C	1000 $\Omega/m$	
	2C	1000 $\Omega/m$	
	3C	1000 $\Omega/m$	

## Velocidad de pulso ultrasónico, PVU

Esta prueba no destructiva detecta la propagación de ondas ultrasónicas en un medio elástico para determinar la densidad y homogeneidad de un material en estado seco, medida en metros por segundo (m/s). Consiste en colocar transductores electroacústicos en contacto con los cubos, utilizando un lubricante para asegurar un medio continuo. Luego, se generan impulsos que son recibidos por el segundo transductor, obteniendo así una lectura.

Tabla 32. Velocidad de pulso Ultrasónico de CC

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC	1A	2256.64 m/s	2231.92 m/s
	2A	2290.91 m/s	
	3A	2308.76 m/s	
	1B	2275.56 m/s	
	2B	2143.46 m/s	
	3B	2116.18 m/s	

Tabla 33. Velocidad de pulso Ultrasónico de CAP 90

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CAP90	1A	2723.40 m/s	2650.09 m/s
	2A	2793.48 m/s	
	3A	2591.84 m/s	
	1B	2687.83 m/s	
	2B	2659.57 m/s	
	3B	2444.44 m/s	

**Tabla 34. Velocidad de pulso Ultrasónico de CAP95.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CAP95	1A	2156.78 m/s	2276.88 m/s
	2A	2318.18 m/s	
	3A	2351.85 m/s	
	1B	2254.60 m/s	
	2B	2205.24 m/s	
	1C	2341.01 m/s	
	2C	2331.78 m/s	
	3C	2302.75 m/s	

**Tabla 35. Velocidad de pulso Ultrasónico de CC-CC.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-CC	1A	2625.64 m/s	2434.47 m/s
	2A	2472.08 m/s	
	3A	2355.00 m/s	
	1B	2515.15 m/s	
	2B	2272.73 m/s	
	3B	2582.01 m/s	
	1C	2422.11 m/s	
	2C	2314.29 m/s	
	3C	2351.22 m/s	

**Tabla 36. Velocidad de pulso Ultrasónico de CA.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CA	1A	3326.80 m/s	3256.35 m/s
	2A	3368.42 m/s	
	3A	3167.70 m/s	
	1B	3326.80 m/s	
	2B	3377.48 m/s	
	3B	3109.09 m/s	
	1C	3161.49 m/s	
	2C	3275.64 m/s	
	3C	3193.75 m/s	

## Resistencia mecánica

La resistencia a compresión es la medida máxima de resistencia a una carga axial en especímenes endurecidos de matrices de cal, cemento, yeso o polímeros, con o sin áridos, y se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (kgf/cm<sup>2</sup>). Estos datos se utilizan principalmente en los cálculos estructurales. En el caso de los morteros, se emplean para evaluar la resistencia a los impactos en los aplanados, la carga que el mortero debe soportar para el pegado de mampostería y la ejecución de firmes, así como para inferir su adherencia, adhesividad, elasticidad y nivel de protección frente a los agentes meteóricos.

Los resultados de los morteros de cal suelen ser moderados, y se ha observado que la adición de cal en algunos morteros puede disminuir sus propiedades mecánicas pero también alterar su pH, lo que contribuye a evitar el desarrollo de hongos (Santos, Nunes, & Faria, 2017).

**Tabla 37. Resistencia a la compresión de CC.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC	1A	24.61 Kg/cm <sup>2</sup>	24.01 Kg/cm <sup>2</sup>
	2A	19.61 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	24.75 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1B	26.19 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2B	23.77 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3B	25.16 Kg/cm <sup>2</sup>	

**Tabla 38. Resistencia a la compresión de CAP 90.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CAP90	1A	43.91 Kg/cm <sup>2</sup>	45.16 Kg/cm <sup>2</sup>
	2A	41.80 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	50.94 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1B	48.46 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2B	39.69 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3B	46.16 Kg/cm <sup>2</sup>	

**Tabla 39. Resistencia a la compresión de CAP95.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CAP95	1A	31.59 Kg/cm <sup>2</sup>	31.67 Kg/cm <sup>2</sup>
	2A	32.43 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	33.97 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1B	32.31 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2B	33.94 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1C	29.78 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2C	29.60 Kg/cm <sup>2</sup>	

	3C	29.80 Kg/cm <sup>2</sup>	
--	----	--------------------------	--

**Tabla 40. Resistencia a la compresión de CC-P.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-P	1A	9.21 Kg/cm <sup>2</sup>	10.69 kg/cm <sup>2</sup>
	2A	11.40 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	11.45 Kg/cm <sup>2</sup>	

**Tabla 41. Resistencia a la compresión de CC-CC.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-CC	1A	30.32 Kg/cm <sup>2</sup>	31.90 Kg/cm <sup>2</sup>
	2A	28.97 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	30.07 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1B	31.34 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2B	30.69 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3B	29.33 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1C	36.78 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2C	33.05 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3C	36.37 Kg/cm <sup>2</sup>	

**Tabla 42. Resistencia a la compresión de CC-P-CC.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CC-P-CC	1A	11.33 Kg/cm <sup>2</sup>	10.81 Kg/cm <sup>2</sup>
	2A	08.80 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	12.31 Kg/cm <sup>2</sup>	

**Tabla 43. Resistencia a la compresión de CA.**

Mortero	Espécimen	resultado	Promedio
CA	1A	141.55 Kg/cm <sup>2</sup>	148.29 Kg/cm <sup>2</sup>
	2A	134.59 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3A	139.67 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1B	139.18 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2B	141.97 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3B	165.60 Kg/cm <sup>2</sup>	
	1C	162.18 Kg/cm <sup>2</sup>	
	2C	142.08 Kg/cm <sup>2</sup>	
	3C	167.79 Kg/cm <sup>2</sup>	

## Conductividad térmica

Este parámetro es muy importante ya que sea para reacondicionar estructuras (Longo, et.al, 2020) o construir ya que puede existir un mejoramiento térmico en los edificios. Las pruebas se realizaron con el equipo KD2 Pro en la Universidad de Colima, siendo cilindros los que se probaron, quedando los siguientes resultados:

**Tabla 44. Conductividad térmica de los morteros.**

Mortero	Conductividad térmica
CC	0.260 (W/m·K)
CAP90	0.364 (W/m·K)
CAP95	0.362 (W/m·K)
CC-P	0.101 (W/m·K)
CC-CC	0.425 (W/m·K)
CC-P-CC	0.098 (W/m·K)
CA	0.525 (W/m·K)

Los resultados muestran que los morteros de cal con menor conductividad térmica son aquellos que contienen PET, seguidos de los morteros con CC, CAP95, CAP90 y, por último, CC-CC. En cuanto al mortero de base de cemento (CA), presenta una conductividad térmica mayor en comparación con los demás.

## Colorimetría

Así es, los colores desempeñan un papel fundamental en la arquitectura, ya que contribuyen significativamente a la estética y percepción visual de los espacios construidos. Es esencial conocer las propiedades cromáticas de los materiales para poder seleccionar los colores adecuados y tenerlos en cuenta desde el inicio del proceso de diseño. Además, junto con las características técnicas de los materiales, como su durabilidad, resistencia y comportamiento térmico, la elección del color puede influir en el impacto visual y emocional de un edificio o espacio arquitectónico. Por lo tanto, la consideración de los colores y sus propiedades en la arquitectura es un aspecto clave para lograr resultados estéticos y funcionales satisfactorios. Los morteros estudiados tienen los siguientes resultados:

Tabla 45. Colorimetría de los morteros

Mortero	L*	a*	b*
	Luminosidad	rojo-verde	azul-amarillo
CC	85.93	0.14	2.53
CAP90	91.37	0.98	4.86
CAP95	84.1	0.49	3.58
CC-P	91.42	0.25	3.13
CC-CC	83.58	1.05	5.85
CC-P-CC	85.95	1.41	6.84
CA	78.04	0.55	4.65

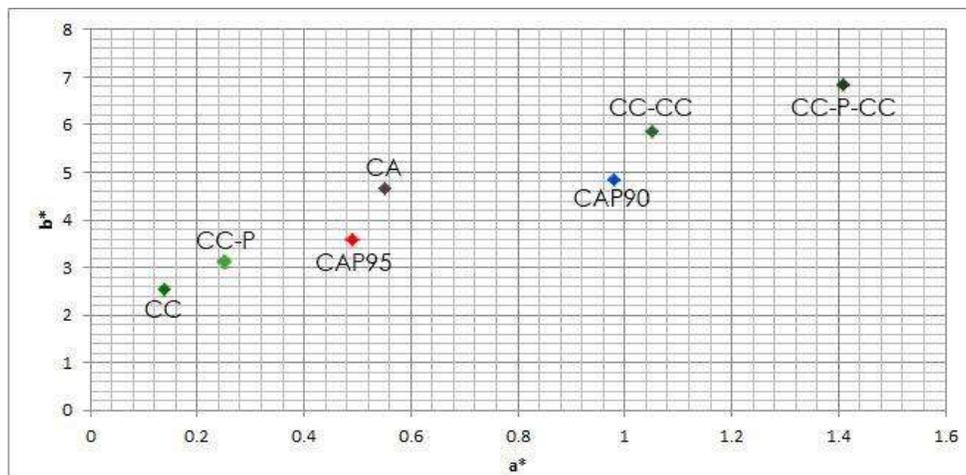


Gráfico. 5. Colorimetría

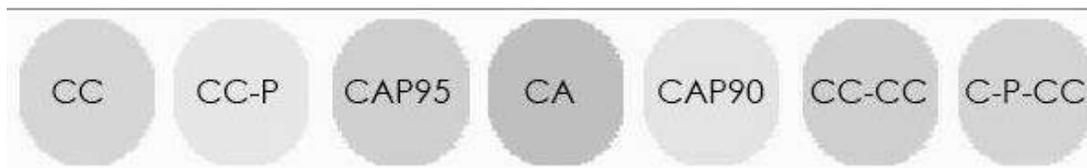
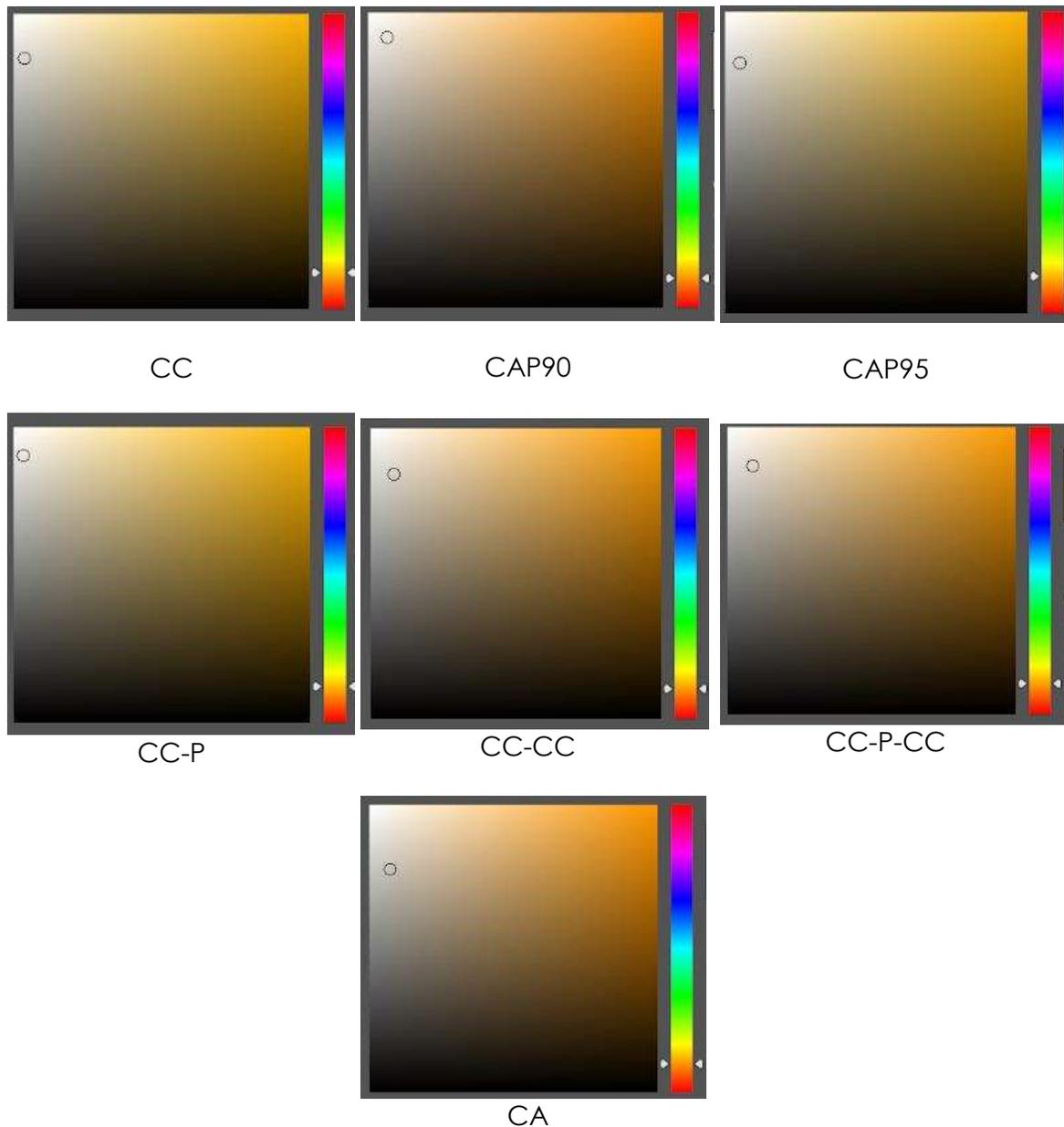


Figura 62. Colores de los morteros



**Figura 63. Esquema de colores secuenciales de los morteros.**

En conclusión, los resultados presentados en este capítulo ofrecen una visión detallada y exhaustiva de los hallazgos obtenidos a partir de las pruebas y análisis realizados en el marco de esta investigación. Estos resultados representan un avance significativo en nuestro entendimiento de los morteros para la construcción y tienen importantes implicaciones tanto teóricas como prácticas en el campo de estudio.

Es importante destacar que si bien los resultados aquí presentados son fundamentales, también plantean nuevas preguntas y áreas de investigación que

merecen una mayor exploración. En el siguiente capítulo, se abordará en detalle la discusión de estos resultados.

El capítulo de resultados nos sirve para tener una perspectiva y como punto de partida para un análisis más profundo y reflexivo sobre los temas tratados, y que contribuya al avance continuo del conocimiento en este campo.

## Capítulo V. Discusión de resultados

En este capítulo, se profundiza en la interpretación y discusión de los resultados obtenidos en relación con la resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia mecánica y conductividad térmica de los morteros estudiados. El análisis se centra en identificar patrones, relaciones y posibles influencias de los diferentes materiales y aditivos utilizados en la composición de los morteros.

Inicialmente, se discutirá la resistividad eléctrica de los morteros, destacando las observaciones significativas obtenidas durante las pruebas. Se explorará cómo la composición de los morteros, particularmente la adición de materiales como arena volcánica, polietileno tereftalato (PET) y carbonato de calcio, puede influir en las propiedades eléctricas del material. Asimismo, se analizará el impacto de la finura del agregado y la relación superficial en la homogeneidad de los morteros.

Posteriormente, se abordará la resistencia mecánica de los morteros, examinando las diferencias observadas entre los diversos tipos de morteros y sus respectivas composiciones. Se identificarán factores clave que contribuyen a la resistencia del material, como la presencia de carbonato de calcio y la pureza de la cal utilizada.

Finalmente, se discutirá la conductividad térmica de los morteros y su relación con los diferentes agregados y tipos de cal. Se analizará cómo estas variables influyen en la capacidad de transferencia de calor de los morteros, y se identificarán las implicaciones prácticas de estos hallazgos en términos de eficiencia energética y confort térmico en aplicaciones constructivas.

En conjunto, este análisis crítico de los resultados busca enriquecer nuestra comprensión de las propiedades y el comportamiento de los morteros estudiados, proporcionando una base sólida para la formulación de conclusiones.

## Resistividad eléctrica

Los valores de resistividad eléctrica son indicativos de la calidad del mortero, ya que reflejan su estructura y composición. Valores más altos de resistividad están asociados a una menor porosidad interconectada, lo que significa que el mortero tiene una menor probabilidad de sufrir deterioro. Los poros en la estructura del mortero son vías por las cuales las sales pueden distribuirse y llegar a la superficie, provocando la formación de eflorescencias. Esto a su vez puede generar microfisuras y desintegración del mortero (Nogueira, et.al, 2020). Por lo tanto, la resistividad eléctrica es un parámetro importante a considerar para evaluar la durabilidad de los morteros. En esta investigación los valores obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 46. Resultados de la resistividad eléctrica de los morteros

Mortero	Resistividad eléctrica
CC	381.7 $\Omega/m$
CAP90	450.0 $\Omega/m$
CAP95	352.2 $\Omega/m$
CC-P	93.3 $\Omega/m$
CC-CC	311.1 $\Omega/m$
CC-P-CC	210.0 $\Omega/m$
CA	1144.4 $\Omega/m$

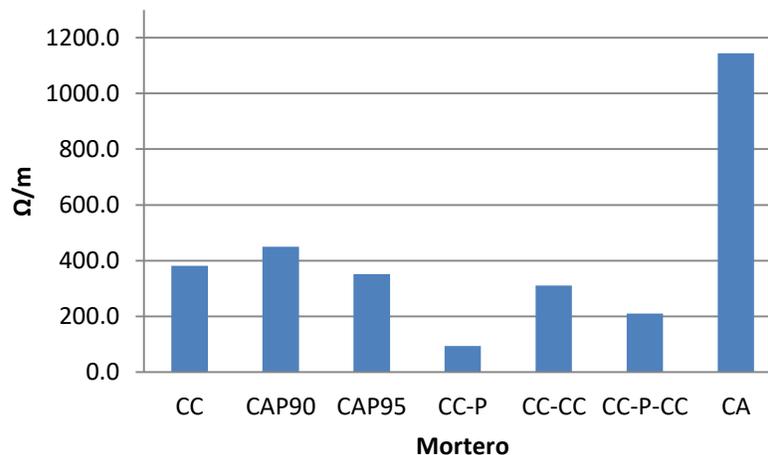


Gráfico. 6. Resistividad eléctrica de los morteros

Al analizar los resultados de resistividad eléctrica de los morteros, se pueden realizar las siguientes observaciones y discusiones:

Considerando que el mortero CA es el cemento de albañilería utilizado como testigo para la comparación, se nota que presenta el valor más alto de resistividad eléctrica. Esto sugiere que el cemento de albañilería tiene una menor capacidad para conducir la corriente eléctrica en comparación con los otros morteros estudiados.

En cuanto a los morteros de cal, se observa que la CAP90 tiene un valor más alto de resistividad eléctrica en comparación con la CC. Esto puede atribuirse a la adición de arena volcánica, que presenta diferentes características granulométricas y puede influir en las propiedades eléctricas del mortero. En

general, se puede concluir que la arena volcánica no parece tener un efecto significativo en la resistividad eléctrica de los morteros de cal.

Por otro lado, los morteros con adición de PET muestran resultados interesantes. El mortero con PET y carbonato de calcio presenta el valor más alto de resistividad eléctrica entre los morteros con PET. Esto sugiere que el carbonato de calcio puede contribuir a las propiedades eléctricas del mortero.

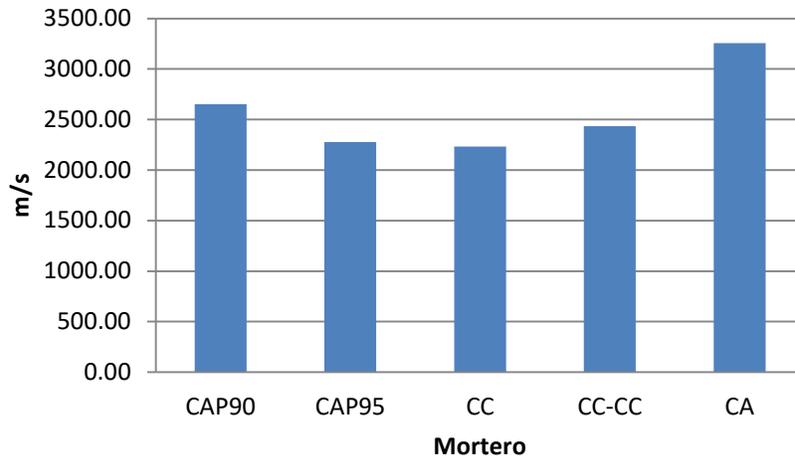
Los resultados indican que la composición de los morteros, particularmente la adición de materiales como arena volcánica y PET, puede influir en la resistividad eléctrica. Mientras que la arena volcánica no parece tener un impacto significativo en la resistividad eléctrica, el PET y el carbonato de calcio pueden afectar las propiedades eléctricas del mortero.

## Velocidad de pulso ultrasónico

Los resultados de la velocidad de pulso en cuanto a los que contienen PET no se logró tener un resultado por parte de la prueba pero se encontró en un artículo que mencionan que el PET disminuye la rigidez del material y la velocidad de onda ultrasónica en este caso fueron morteros de cemento/cal y PET (Spósito, y otros, 2020).

**Tabla 47 . Resultados de la Velocidad de pulso ultrasónico.**

Clave mortero	Velocidad de pulso
CC	2231.92 m/s
CAP90	2650.09 m/s
CAP95	2276.88 m/s
CC-CC	2434.47 m/s
CA	3256.35 m/s



**Gráfico. 7 . Velocidad de pulso ultrasónico**

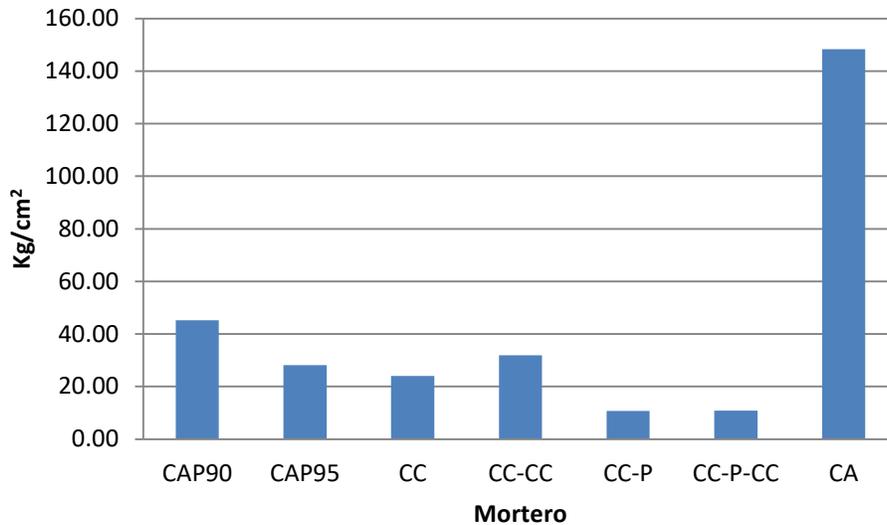
Los resultados de la velocidad de pulso indican que a mayor valor, el mortero presenta una mejor homogeneidad. En este sentido, el mortero de base de cemento (CA) obtuvo el valor más alto, mientras que el mortero de cal CAP90 mostró una excelente homogeneidad, posiblemente debido a su alta relación superficial del mismo material de cal. A continuación, le sigue el mortero CC-CC, el cual contiene carbonato de calcio, lo que podría estar relacionado con la finura del agregado. Por otro lado, se observó que los morteros CAP95 y CC obtuvieron valores inferiores en comparación con los anteriores.

## Resistencia a la compresión

Los morteros de cal tienen un lento fraguado, lo que resulta en resistencias a la compresión considerablemente menores a edades tempranas en comparación con el cemento, se obtuvieron los siguientes resultados a los 260 días:

**Tabla 48. Resultados de resistencia a la compresión**

Mortero	Resistencia a la compresión
CC	24.01 Kgf/cm <sup>2</sup>
CAP90	45.16 Kgf/cm <sup>2</sup>
CAP95	28.16 Kgf/cm <sup>2</sup>
CC-P	10.69 Kgf/cm <sup>2</sup>
CC-CC	31.88 Kgf/cm <sup>2</sup>
CC-P-CC	10.81 Kgf/cm <sup>2</sup>
CA	148.29 Kgf/cm <sup>2</sup>



**Gráfico. 8. Resistencia a la compresión.**

En este apartado, se destaca que el mortero de base de cemento (CA) presenta una resistencia mucho más alta (148.29 Kgf/cm<sup>2</sup>) en comparación con los morteros de cal, por lo que no se considera en este análisis. Entre los morteros de cal, se observa que el de tipo CAP90 (45.16 Kgf/cm<sup>2</sup>) es el que muestra la mayor resistencia, seguido por CAP95 (28.16 Kgf/cm<sup>2</sup>), CC-CC (31.88 Kgf/cm<sup>2</sup>) y CC (24.01 Kgf/cm<sup>2</sup>), todos elaborados con arena volcánica. Por otro lado, los morteros que incluyen PET como agregado muestran resistencias menores pero similares entre sí, oscilando entre 10.81 Kgf/cm<sup>2</sup> (CC-P-CC) y 10.69 Kgf/cm<sup>2</sup> (CC-P). Se destaca que la presencia de carbonato de calcio como agregado fino parece influir en la resistencia mecánica de los morteros.

## Conductividad térmica

Para esta investigación se utilizó el equipo KD2 Pro para medir la conductividad térmica, este es utilizado para estudios que van en relación con la eficiencia energética y el aislamiento térmico. Este es un método de sonda de transferencia de calor en estado estacionario, consiste en dos placas con sensores de temperatura colocados en el espécimen por medio de una sonda y se aplica calor en forma de flujo a través de las placas, y se miden las diferencias entre las placas y por medio de un cálculo en base a la ley de Fourier y las propiedades geométricas de la sonda. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 49. Resultados conductividad térmica.

Mortero	Conductividad térmica
CC	0.26 (W/m·K)
CAP90	0.364 (W/m·K)
CAP95	0.362 (W/m·K)
CC-P	0.101 (W/m·K)
CC-CC	0.425 (W/m·K)
CC-P-CC	0.098 (W/m·K)
CA	0.525 (W/m·K)

La conductividad térmica se refiere a la capacidad de un material para transferir calor. En el caso de los morteros estudiados, se observa que aquellos que contienen PET como agregado muestran la menor conductividad, siendo CC-P-CC el de menor valor, seguido de cerca por CC-P y CC. Los morteros con cal de alta pureza presentan resultados similares entre sí, seguidos por CC-CC, mientras que el de mayor conductividad térmica es CA. Estos datos muestran cómo los diferentes agregados y tipos de cal pueden influir en las propiedades térmicas de los morteros y, por ende, en su capacidad de transferir calor.

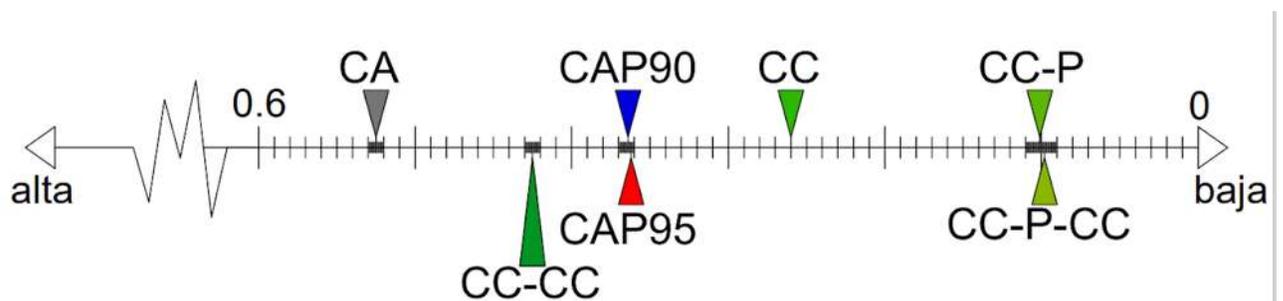
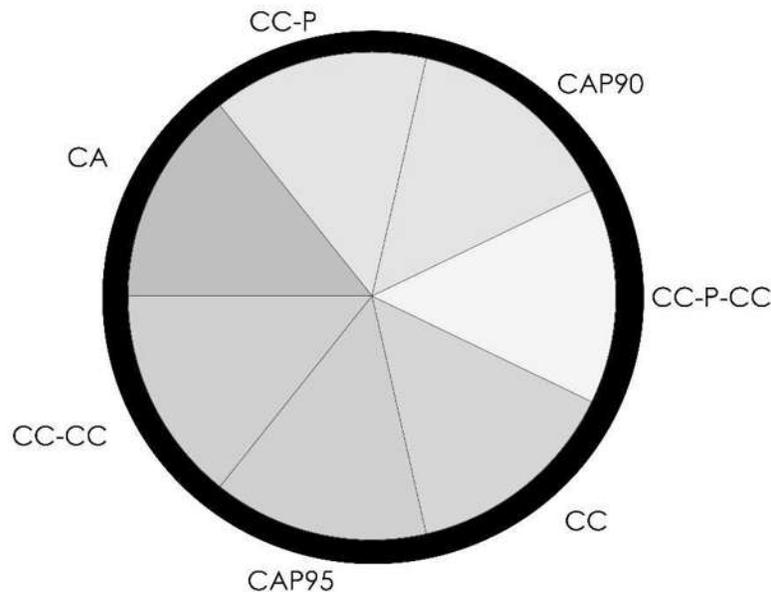


Gráfico. 9. Conductividad térmica

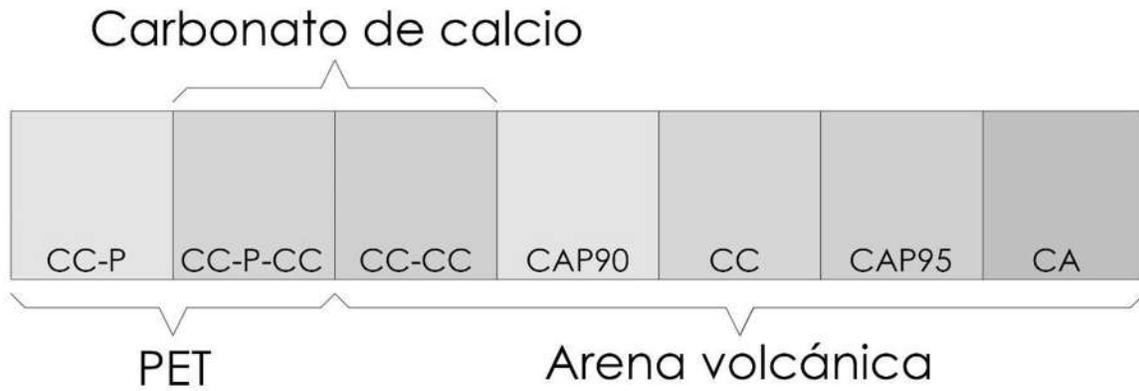
## Colorimetría

El valor  $L^*$  (luminosidad) es un parámetro importante en la caracterización del color de los morteros, ya que representa la percepción de la luminosidad o el brillo. Según los datos proporcionados, podemos observar que los morteros tienen diferentes niveles de luminosidad, lo que afecta directamente su apariencia visual. El mortero CC-P muestra el valor  $L^*$  más alto, lo que indica que es más luminoso o más claro en apariencia en comparación con los demás morteros. En orden descendente de luminosidad, le siguen CAP 90, CC-P-CC, CC-CAP95, CC-CC y finalmente CA, que presenta la menor reflectancia de luz y, por lo tanto, es el más oscuro o menos luminoso de todos. Estos datos son importantes para la selección de morteros en proyectos de construcción, ya que el valor  $L^*$  afecta directamente la estética y la percepción visual de los espacios arquitectónicos.



**Figura 64. Luminosidad. Realizado por el autor**

Los agregados utilizados, como la arena volcánica, PET y carbonato de calcio, tienen un impacto significativo en el color de los morteros. La arena volcánica tiende a proporcionar un color más oscuro y terroso al mortero, mientras que el PET reciclado puede agregar un matiz más claro y variaciones sutiles de colores dependiendo de su origen. Por otro lado, el carbonato de calcio tiende a aportar un color más hacia los amarillos mortero.



**Figura 65. Diferencia de la colorimetría de los morteros. Realizado por el autor.**

Estas diferencias en el color pueden ser consideradas durante el proceso de diseño y selección de materiales para lograr el resultado estético deseado en la construcción.

## Capítulo VI. Relación de los resultados

Estas diferencias en el color pueden ser consideradas durante el proceso de diseño y selección de materiales para lograr el resultado estético deseado en la construcción.

Este capítulo se centra en explorar las relaciones entre diversas propiedades físicas y mecánicas de los morteros estudiados, con el objetivo de identificar posibles correlaciones y patrones que puedan arrojar luz sobre su comportamiento y desempeño en aplicaciones constructivas. Se analizarán específicamente tres relaciones clave: la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, la relación entre la resistividad eléctrica y la conductividad térmica, y la relación entre la densidad del mortero y la conductividad térmica.

En primer lugar, se examinará la relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, dos propiedades fundamentales que pueden proporcionar información sobre la integridad estructural y la calidad del mortero. Se explorará si existe una correlación significativa entre estas dos variables y cómo esta relación puede influir en la evaluación de la resistencia del material.

A continuación, se analizará la relación entre la resistividad eléctrica y la conductividad térmica, considerando la posible interacción entre estas dos propiedades físicas. Se investigará si los morteros con una mayor resistividad eléctrica también presentan una menor conductividad térmica, y viceversa, y cómo esta relación puede afectar la capacidad del mortero para transferir calor y conducir la electricidad.

Finalmente, se examinará la relación entre la densidad del mortero y la conductividad térmica, centrándose en cómo la compacidad del material puede influir en su capacidad para conducir el calor. Se explorará si existe una correlación entre la densidad del mortero y su conductividad térmica, y cómo esta relación puede afectar el rendimiento térmico del material en diferentes aplicaciones constructivas.

En conjunto, este análisis de las relaciones entre los resultados proporcionará una comprensión más profunda de las propiedades y el comportamiento de los morteros estudiados, lo que contribuirá al desarrollo de estrategias más efectivas para su aplicación en la práctica constructiva.

## Relación entre Velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión

La resistencia mecánica de un material se refiere a su capacidad para resistir fuerzas sin sufrir deformaciones o fallas, y está estrechamente relacionada con la integridad y cohesión del material. Por otro lado, la velocidad del pulso ultrasónico es una medida de cómo se propagan las ondas a través del material, y está influenciada por la densidad y uniformidad del mismo. Existe una relación entre estas dos medidas, ya que una mayor resistencia mecánica generalmente se correlaciona con una mayor velocidad de pulso ultrasónico (Boffill, Blanco, Lombillo, Villegas, & Thomas, 2014).

Es importante destacar que en esta investigación no fue posible medir la velocidad de pulso ultrasónico en los morteros que contenían PET como agregado, debido a que se consideró que el material presentaba huecos o vacíos. Sin embargo, se pueden establecer relaciones entre los demás morteros analizados.

Basándonos en los resultados obtenidos, es evidente que los morteros restantes exhiben distintas características en cuanto a resistencia mecánica y velocidad de pulso ultrasónico, las cuales están fuertemente influenciadas por su porosidad (Quintero Ortiz, Herrera, Corzo, & García, 2011). Estos hallazgos serán de gran relevancia para comprender mejor el comportamiento de los morteros y permitirán tomar decisiones informadas en futuros proyectos de construcción y selección de materiales.

Existe una relación entre la resistencia mecánica y la velocidad del pulso ultrasónico en los materiales estudiados. Sin embargo, es importante tener en cuenta las limitaciones y consideraciones particulares de cada material y realizar un análisis más detallado para obtener conclusiones específicas sobre la influencia de estas propiedades en los morteros estudiados.

Tabla 50. Relación entre Velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión

Mortero	Velocidad de pulso ultrasónico	Resistencia a la compresión
CC	2231.92 m/s	24.01 Kg/cm <sup>2</sup>
CAP90	2650.09 m/s	45.16 Kg/cm <sup>2</sup>
CAP95	2276.88 m/s	28.16 Kg/cm <sup>2</sup>
CC-P	No hubo lecturas	10.69 Kg/cm <sup>2</sup>
CC-CC	2434.47 m/s	31.88 Kg/cm <sup>2</sup>
CC-P-CC	No hubo lecturas	10.81 Kg/cm <sup>2</sup>
CA	3256.35 m/s	148.29 Kg/cm <sup>2</sup>

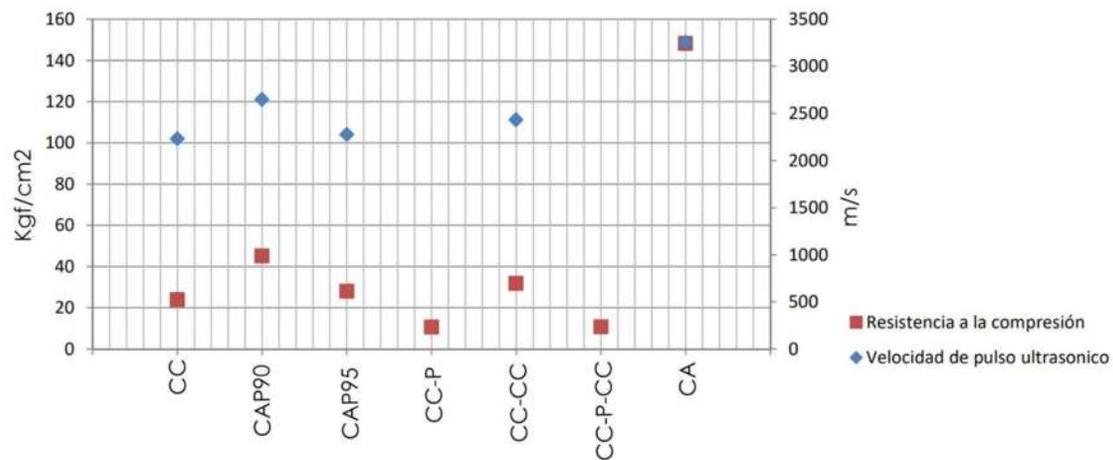


Gráfico. 10. Relación entre Velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión

A medida que el valor de la velocidad de pulso ultrasónico aumenta, se suele asociar con una mayor resistencia mecánica en los morteros. Esta relación se puede apreciar en la gráfica donde se observa que el mortero CA presenta valores muy altos en ambas propiedades. A continuación, siguiendo con CAP90, CAP95 y CC, se nota que a mayor homogeneidad del mortero de cal, existe una tendencia hacia una mayor resistencia mecánica.

Esto sugiere que la homogeneidad de los morteros de cal puede tener un impacto significativo en su resistencia mecánica. Un mortero más homogéneo tiende a tener una mayor resistencia, lo que indica una mejor cohesión y un mejor comportamiento estructural. Es importante tener en cuenta que otros factores, como la relación de mezcla, la

adición de aditivos o la calidad de los materiales, también pueden influir en la resistencia mecánica de los morteros de cal.

La velocidad de pulso ultrasónico es un indicador útil para evaluar la resistencia mecánica de los morteros. Una mayor homogeneidad en los morteros de cal se relaciona con una mayor resistencia mecánica, lo que puede ser un aspecto importante a considerar al seleccionar y diseñar morteros para aplicaciones estructurales.

## Relación entre la resistividad eléctrica y conductividad térmica

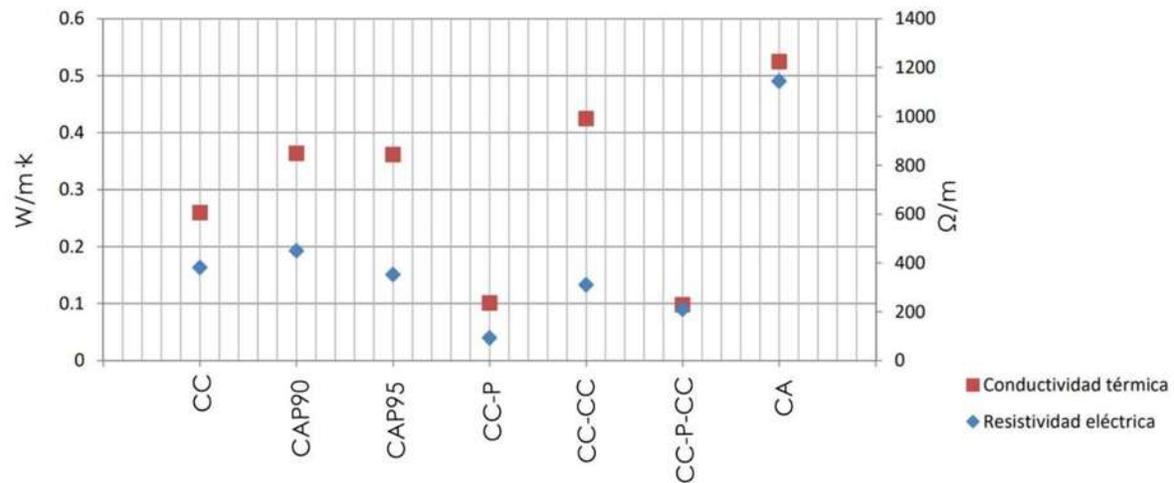
La resistividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica, y generalmente se asocia con la conductividad eléctrica de un material. Los materiales que son buenos conductores eléctricos, como los metales, también tienden a ser buenos conductores del calor.

Es importante destacar que, además de la resistividad eléctrica, otros factores como la composición del material, la estructura, la densidad y la presencia de impurezas pueden influir en la conductividad térmica.

En esta investigación, se han obtenido los siguientes valores de resistividad eléctrica para los materiales estudiados:

**Tabla 51. Relación entre la resistividad eléctrica y conductividad térmica**

Mortero	Resistividad eléctrica	Conductividad térmica
CC	381.7 $\Omega/m$	0.260 (W/m·K)
CAP90	450.0 $\Omega/m$	0.364 (W/m·K)
CAP95	352.2 $\Omega/m$	0.362 (W/m·K)
CC-P	93.3 $\Omega/m$	0.101 (W/m·K)
CC-CC	311.1 $\Omega/m$	0.425 (W/m·K)
CC-P-CC	210.0 $\Omega/m$	0.098 (W/m·K)
CA	1144.4 $\Omega/m$	0.525 (W/m·K)



**Gráfico. 11. Relación entre la resistividad eléctrica y conductividad térmica.**

La resistividad eléctrica y la conductividad térmica son propiedades importantes en los materiales. Se observa que a medida que la resistividad eléctrica aumenta, la porosidad del material tiende a ser mayor. Por otro lado, una conductividad térmica cercana a 1 indica una mayor capacidad de conducción del calor.

En base a la comparación de resultados, podemos notar que el mortero CA, al ser de cemento, muestra valores más altos en ambas propiedades, lo que indica una menor porosidad pero una baja capacidad de aislamiento térmico. Por otro lado, los morteros de cal con arena volcánica, como CC-CC, muestran una menor porosidad, pero no son tan buenos aislantes térmicos. Los morteros con PET, en cambio, tienen buenas propiedades de aislamiento térmico, pero su resistividad eléctrica es baja.

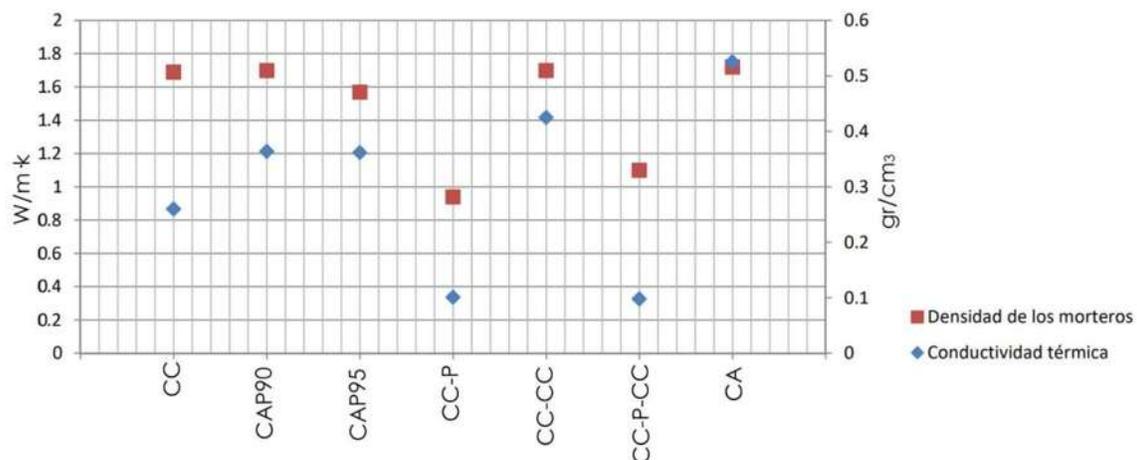
Es importante considerar tanto la resistividad eléctrica como la conductividad térmica al evaluar las propiedades de los morteros. Cada tipo de mortero tiene sus ventajas y desventajas en términos de porosidad y capacidad de aislamiento térmico, por lo que es necesario seleccionar el tipo de mortero más adecuado en función de las necesidades y requisitos específicos del proyecto.

## Relación de la densidad del mortero y la conductividad térmica

Los materiales de baja densidad se consideran que tienen excelentes propiedades aislantes (Gutiérrez & González, 2012). En esta investigación, se tomaron en cuenta distintos tipos de cales, especialmente aquellas con mayor pureza que son menos densas que otros cementantes, y el PET como agregado reciclado. Al considerar los resultados, es posible establecer una relación entre la conductividad térmica y la densidad de los morteros estudiados.

**Tabla 52. Relación de la densidad del mortero y la conductividad térmica**

Mortero	Conductividad térmica	Densidad de los morteros
CC	0.260 (W/m·K)	1.69 gr/cm <sup>3</sup>
CAP90	0.364 (W/m·K)	1.70 gr/cm <sup>3</sup>
CAP95	0.362 (W/m·K)	1.57 gr/cm <sup>3</sup>
CC-P	0.101 (W/m·K)	0.94 gr/cm <sup>3</sup>
CC-CC	0.425 (W/m·K)	1.70 gr/cm <sup>3</sup>
CC-P-CC	0.098 (W/m·K)	1.10 gr/cm <sup>3</sup>
CA	0.525 (W/m·K)	1.72 gr/cm <sup>3</sup>



**Gráfico. 12 . Relación de la densidad del mortero y la conductividad térmica.**

Podemos observar que los morteros con mayor conductividad térmica también presentan una densidad más alta. El mortero con la mayor densidad es el CA, con un valor de 1.72 gr/cm<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0.525 W/m·K, seguido por el CC-CC, que tiene una densidad de 1.70 gr/cm<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0.425 W/m·K. En contraste, el mortero CC-P, con una densidad de 0.94 gr/cm<sup>3</sup>, tiene la menor conductividad térmica registrada de 0.101 W/m·K, seguido

por el CC-P-CC, con una densidad de 1.10 gr/cm<sup>3</sup> y una conductividad térmica de 0.098 W/m·K, lo que sugiere que tiene una mejor capacidad aislante.

Estos resultados revelan una relación entre la densidad de los morteros y su conductividad térmica. Los morteros con menor densidad tienden a tener una menor conductividad térmica, mientras que aquellos con mayor densidad presentan una conductividad térmica más elevada. Estas observaciones pueden ser de gran importancia para la selección adecuada de materiales y el diseño de estructuras, ya que la densidad del mortero puede tener un impacto significativo en el desempeño térmico de los edificios.

Es importante tener en cuenta que, además de la densidad, otros factores pueden influir en las propiedades térmicas de los morteros, como la composición y la porosidad. Es necesario considerar estos factores adicionales al evaluar y seleccionar los materiales más adecuados para aplicaciones específicas en la construcción. En futuras investigaciones, se podría profundizar en el análisis de cómo la porosidad y la composición del mortero interactúan con la densidad para influir en sus propiedades térmicas y, así, obtener un panorama más completo sobre el comportamiento térmico de estos materiales.

## Capítulo VII. Conclusiones

Esta investigación se centra en la caracterización física y térmica de los morteros de cal en comparación con el cemento de albañilería, que es ampliamente utilizado en la construcción en México. Además, se evaluó el uso del PET como agregado sustentable y el carbonato de calcio como agregado fino. Se consideró especialmente la densidad de los morteros debido a su potencial para proporcionar diferentes características.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron pruebas de conductividad térmica, resistencia a la compresión y resistividad eléctrica en los morteros. Los se muestran en la tabla 50 comparativa que permitió obtener conclusiones significativas sobre las propiedades de los morteros analizados.

**Tabla 53 . Resumen de resultados.**

Morteros	Densidad		Resistividad eléctrica		Velocidad de pulso		Resistencia a la compresión		Conductividad térmica	
<b>CA</b>	1.72	gr/cm <sup>3</sup>	1144.40	Ω/m	3256.4	m/s	148.29	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.525	(W/m·K)
<b>CAP90</b>	1.70	gr/cm <sup>3</sup>	450.00	Ω/m	2650.1	m/s	45.16	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.364	(W/m·K)
<b>CAP95</b>	1.57	gr/cm <sup>3</sup>	352.20	Ω/m	2276.9	m/s	28.16	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.362	(W/m·K)
<b>CC-CC</b>	1.70	gr/cm <sup>3</sup>	311.10	Ω/m	2434.5	m/s	31.88	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.425	(W/m·K)
<b>CC</b>	1.69	gr/cm <sup>3</sup>	381.70	Ω/m	2231.9	m/s	24.01	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.260	(W/m·K)
<b>CC-P-CC</b>	1.10	gr/cm <sup>3</sup>	210.00	Ω/m			10.81	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.098	(W/m·K)
<b>CC-P</b>	0.94	gr/cm <sup>3</sup>	93.30	Ω/m			10.69	Kgf/cm <sup>2</sup>	0.101	(W/m·K)

La información obtenida a través de las pruebas realizadas proporcionó datos valiosos para la selección adecuada de materiales en proyectos de construcción, teniendo en cuenta aspectos como la durabilidad, resistencia mecánica, aislamiento térmico y eficiencia energética de las estructuras.

La elección del mortero adecuado en la construcción es crucial y depende de una variedad de características tanto en su estado fresco como endurecido. En este estudio, se ha evaluado una gama de morteros en términos de sus propiedades físicas y mecánicas para determinar su idoneidad en diferentes aplicaciones constructivas.

El cemento de albañilería (CA) sobresale por su alta resistencia mecánica, homogeneidad y baja porosidad. Sin embargo, su conductividad térmica elevada puede no ser ideal en regiones con altas temperaturas. Por otro lado, el mortero CAP90, compuesto por cal y arena volcánica, exhibe una resistencia a la compresión superior, menor porosidad y mayor homogeneidad. Su baja

conductividad térmica lo convierte en una opción valiosa para mejorar el confort térmico en estructuras.

La inclusión de carbonato de calcio como agregado fino tiene un impacto significativo en las propiedades de los morteros. Por ejemplo, el mortero CC-CC muestra una mayor resistencia mecánica y homogeneidad en comparación con CC, lo que sugiere que la finura del agregado puede mejorar la calidad del mortero.

Los morteros con polietileno tereftalato (PET) exhiben una baja conductividad térmica, lo que los hace ideales para aplicaciones donde se requiere aislamiento térmico. Sin embargo, su resistencia mecánica es inferior, lo que puede limitar su uso en ciertos contextos.

En cuanto a la densidad y conductividad térmica, se observa una relación inversa; los morteros con menor densidad tienden a tener una menor conductividad térmica, lo que sugiere una mejor capacidad de aislamiento térmico.

La selección del mortero adecuado debe basarse en las necesidades específicas del proyecto, considerando factores como resistencia mecánica, conductividad térmica y durabilidad. Los resultados de este estudio proporcionan información valiosa para los profesionales de la construcción, destacando la importancia de considerar una variedad de factores al seleccionar morteros para aplicaciones específicas. Además, se identifica el potencial de materiales reciclables, como el PET, como una opción sostenible en la fabricación de morteros en ciertos contextos. Estos hallazgos pueden contribuir significativamente al avance en la eficiencia y sostenibilidad de las prácticas constructivas.

Considerando los hallazgos de este estudio, surgen varias preguntas de investigación que podrían abordarse en futuras investigaciones. Por ejemplo, ¿es posible desarrollar un material de mortero convencional optimizado que combine las propiedades deseables de diferentes materiales, como la resistencia mecánica del cemento de albañilería y la baja conductividad térmica de los morteros de cal con agregados específicos? Además, ¿cómo podrían incorporarse materiales reciclables, como el PET, de manera más efectiva en la fabricación de morteros para mejorar su desempeño y sostenibilidad?

Como investigadora, visualizo un futuro donde la ingeniería de materiales para la construcción se beneficie de enfoques multidisciplinarios y tecnológicos innovadores. La síntesis de materiales convencionales con aditivos avanzados y el desarrollo de técnicas de fabricación optimizadas podrían conducir a la creación de morteros con propiedades mejoradas y adaptadas a diversas aplicaciones arquitectónicas y climáticas.

Desde una perspectiva arquitectónica, el conocimiento generado en este estudio sobre la relación entre la conductividad térmica y la resistencia mecánica de los morteros puede tener un impacto significativo en la eficiencia energética y el diseño de edificaciones sostenibles.

## Referencias bibliográficas

- Aditya, L., Mahlia, T., Rismachi, B., Ng, H., Hasan, M., Metselaar, H., y otros. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1352-1365.
- Albatici, R., & Tonelli, A. M. (2010). Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 2177-2183.
- Al-Jabri, K., Shoukry, H., Mokhtar, M. M., & Morsy, M. S. (2019). Thermo-physical, mechanical and microstructural properties of cementless lightweight mortar. *Advances in Cement Research*, 1-12.
- Alonso Olvera, A. (2013). Agregados de morteros y conglomerados de cal. En L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal. Historia, Propiedades y Usos* (págs. 75-96). Distrito Federal: UNAM; Instituto de Investigaciones Antropológicas; Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, A.C.
- Ambriz García, J. J., García Chávez, J. R., & Paredes Rubio, H. R. (2009). Determinación experimental de las condiciones de confort termico en edificaciones. *Boletín-UAM*(188), 1-6.
- Andrade, C., & Andrea, R. D. (Mayo-Agosto de 2011). La resistividad eléctrica como parametro del control del hormigón y de su durabilidad,. *ALCONPAT*, 1(2), 90-98.
- ARGOS. (2023). 360 en Concreto. Recuperado el 2023, de Conociendo las propiedades físicas del cemento ¿qué y cómo?: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/propiedades-fisicas-del-cemento/#:~:text=condici%C3%B3n%20sea%20especificada.-,Densidad,la%20cantidad%20de%20adiciones%20utilizadas.>
- Arreola Sánchez, M., Alonso Guzmán, E. M., Chávez Gracia, H. L., Martínez Molina, W., & Navarrete Seras, M. A. (2017). Ash Substitution Effect in Brick Fabrication in Induration Time and Mechanical Resistance in Mortars Portland Cement Base. *Materials Science Forum*, 83-87.
- Arruda Cavalcanti, J. R., Bezerra Batista, P. I., Viera Póvoas, Y., & Aquini Rocha, J. H. (2020). Comportamiento térmico de mampostería de bloques de yeso hidrófugo con variación del espesor de revestimiento. *Obras y proyectos*, 78-89.
- Ascione, F., Bellia, L., Mazzei, P., & Minichiello, F. (2010). Solar gain and building envelope the surface factor. *Building Research & Information*, 187-205.

- Barajas, B., Castro, A., & De la Cruz, M. (2012). Evaluación de la adherencia rendimiento y costo de los morteros a base de cal en la vivienda sustentable. *XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 1679-1686.
- Berns, R. S. (2019). Numerical Color. En R. S. Berns, *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, Fourth Edition* (págs. 51-84). Inc., John Wiley & Sons.
- Bilgen, E. (2001). Experimental study of massive wall systems with fins attached on the heated wall and with glazing. *HEat an Mass Transfer*, 159-164.
- Boffill, Y., Blanco, H., Lombillo, I., Villegas, L., & Thomas, C. (2014). Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos. *REHABEND*, 705-717.
- Borg, R. P., Baldacchino, O., & Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 29-47.
- Boumhaout, M., Boukhattem, L., Hamdi, H., Benhamou, B., & Ait Nouh, F. (2017). Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. *Construction and Building Materials*, 241-250.
- Calidra. (27 de 03 de 2020). *Ficha de datos de Seguridad Hidróxido de Calcio Quimex 90*. Recuperado el 2023, de <https://www.calidra.com/wp-content/uploads/2021/06/SDS-Hidroxido-de-calcio-QUIMEX-90-Rev-4.pdf>
- Calidra. (27 de 03 de 2020). *Ficha de datos de Seguridad Hidróxido de Calcio Quimex 95*. Recuperado el 2023, de <https://www.calidra.com/wp-content/uploads/2021/06/SDS-Hidroxido-de-calcio-QUIMEX-95-Rev-4.pdf>
- Calidra. (27 de 03 de 2020). *Ficha técnica de seguridad Hidróxido de Calcio*. Recuperado el 2023, de <https://www.calidra.com/wp-content/uploads/2021/06/ficha-tecnica-construccion-esp.pdf>
- Calidra. (05 de 08 de 2021). *Ficha de datos de seguridad- Agrical PM 60*. Recuperado el 2023, de <https://www.calidra.com/wp-content/uploads/2021/05/SDS-Agrical-PM60.pdf>
- CEMEX. (2023). *Cemento CEMEX Mortero*. Recuperado el 2023, de [file:///C:/Users/dnava/Downloads/Ficha-MORTERO\\_OPTIMO-2022%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/dnava/Downloads/Ficha-MORTERO_OPTIMO-2022%20(2).pdf)

- Collet, F., & Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and building materials*, 612-619.
- Collet, F., & Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and Building Materials*, 612-619.
- Comisión Nacional para el uso eficiente de la Energía. (2011). *NORMA Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltante de edificios*. Ciudad de México: Secretaría de Energía.
- Cosoli, G., Mobili, A., Tittarelli, F., Revel, G. M., & Chiariotti, P. (2020). Electrical Resistivity and Electrical Impedance Measurement in Mortar and Concrete Elements: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 10, 1-43.
- Cuitiño-Rosales, M. G., Rotondaro, R., & Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 22, 138-151.
- Daza-Mafioli, C. M., Coral-Escobar, E., & Plaza-Castillo, J. (2019). Medicción de la conductividad térmica en materiales aislantes bajo régimen de flujo de calor no estacionario. *Ingeniería y Ciencia*, 15(330), 101-116.
- Defraeye, T., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2011). Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling. *Energy Conversion and Management*, 52, 512-522.
- Del Rincón Maravilla, C. (2012). *Caracterización térmica de muros y simulación energética de un edificio histórico*. Valencia: Tesis par obtener el grado en Ingeniería de la Edificación, Universidad Politecnica de Valencia.
- Espinosa-Guerrero, G., Cordero-Valdéz, D., Ruíz-Saucedo, A., & Rouz-Gutiérrez, R. S. (2017). Analisis de Aislamiento entre sistemas de muros, como envoltante alternativo para desarrollo de la vivienda social. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 118-133.
- Flori, M., Putan, V., & Vilceanu, L. (2017). Using the heat flow plate method for determining thermal conductivity of buildings materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1-8.
- Galván-Ruiz, M., Hernández, J., Baños, L., Noriega-Montes, J., & Rodríguez-García, M. E. (2009). characterization of calcium carbonate, calcium oxide, and calcium hydroxide as starting point to the improvement of lime for their use in construction. *Journal of materials in civil engineering*, 694-698.

- Garijo, L., Zhang, X., Ruíz, G., & Ortega, J. J. (2020). Age effect on the mechanical properties of natural hydraulic and aerial. *Construction and building*.
- Glória Gomes, M., Flores-Colen, I., da Silva, F., & Pedroso, M. (2018). Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. *Construction and bulding Materials*, 696-705.
- Gutiérrez, A. S., & Rodríguez, J. E. (2019). Sistema de calentamiento escalonado para la medición de la conductividad térmica. *Revista de Física*(59), 21-34.
- Gutiérrez, J. A., & González, A. D. (2012). Determinación experimental de conductividad térmica de materiales aislantes naturales y de reciclado. *Avances en Energías Renovablesy Medio Ambiente*, 41-47.
- Holzhueter, K., & Itonaga, K. (2017). The potential for light straw clay construction in Japan: An examination of the building method and thermal performace . *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 209-213.
- Howland, J. J., & Martín, A. R. (2013). Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones. *Materiales de Construcción*, 63(312), 515-527.
- Huelsz, G., Barrios, G., Rechtman, R., & Rojas, J. (s.f.). Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempos en la evaluación de desempeño térmico de la envolvente de una edificación. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, IX, 10-20.
- INIFED, I. E. (2015). *Normas y Especificaciones para estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones*. Ciudad de México: SEDATU, CONAVI.
- Jaime Ledesma, P. J. (2014). La Técnica Constructiva en la Arquitectura. *Legado de Arquitecturay Diseño*, 21-36.
- Jannot, Y., & Meukam, P. (2004). Simplified estimation method for the dtermination of the thermal effusivity and thermal conductivity using a low cost hot strip. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 1932-1938.
- Klein, D., Hogewoning, S., Schmidt, S.-O., & Middendorf, B. (2010). The influence of calcium hydroxide on the plasticity of lime putties. *2doHistoric Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop*, 511-518.
- Konica Minolta. (2023). *What Is CIE 1976 Lab Color Space?* Recuperado el 2023, de Konica Minolta Sensing Singapore: <https://sensing.konicaminolta.asia/what-is-cie-1976-lab-color-space/>
-

- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and sustainable energy reviews*, 131, 1-20.
- Lage-Cal, S., Folgueras-Díaz, M. B., & Luengo-García, J. C. (2018). Influencia de los materiales de construcción en el confort térmico interior de una casa tradicional asturiana. *2da Jornadas de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería Civil*, 65-68.
- Ledesma, P. J. (2014). La técnica constructiva en la arquitectura. *Legado de Arquitectura y Diseño*(15), 21-37.
- Lee, J., Kim, J., Song, D., Kim, J., & Jang, C. (2016). Impact of external insulation and internal thermal density upon energy consumption of buildings in a temperate climate with four distinct seasons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-8.
- Lira Cortés, L., García Duarte, S., Méndez Lángo, E., & González Durán, E. (2010). Diseño de medición de conductividad térmica de materiales para construcción. *Simposio de Metrología 2010*, 1-6.
- Lizarazo Marriaga, J. M., & Claisse, P. (2009). Resistencia a la compresión y reología de cementantes ambientales. *Ingeniería e Investigación*, 29(2), 5-9.
- Longo, F., Lassandro, P., Moshiri, A., Phatak, T., Aiello, M. A., & Krakowiak, K. J. (2020). Lightweight geopolymer-based mortars for the structural and energy retrofit of buildings. *Energy & Buildings*, 1-12.
- Longo, F., Lassandro, P., Moshiri, A., Phatak, T., Aiello, M. A., & Krakowiak, K. J. (2020). Lightweight geopolymer-based mortars for the structural and energy retrofit of buildings. *Energy & buildings*.
- Martinez Molina, W., Alonso Guzmán, E., Lara Gomez, C., Gonzalez Valdez, F. M., Perez Lopez, T., Reyes Trujeque, J., y otros. (2015). Analysis of Carbonation in Mortars made with Solid Waste as a Substitute for Cement . *International Conference on Structural, Mechanical and Materials Engineering*, 219-222.
- Martínez, W., Torres-Acosta, A., Alonso-Guzmán, E., Chávez, H., Lara, C., Bedolla, A., y otros. (2018). Colorimetry of clays modified with mineral and organic additives. *Revista ALCONPAT*, 163-177.
- Material Properties,s.v. (2023). *PET – Densidad – Resistencia – Punto de fusión – Conductividad térmica*. Recuperado el 2023, de <https://material-properties.org/es/pet-densidad-resistencia-punto-de-fusion-conductividad-termica/>
-

- Mena-Novelo, W. D., Un-Aragón, R., Corona, J., Romero, M., & Oliva, A. (2015). Determinación de la conductividad térmica de materiales en polvo de la Península de. *Ingeniería*, 102-109.
- Mendoza Arce, X., Erazo Navarrete, F., & Mendoza Haro, I. (2016). Diseño de una caja Caliente bajo la norma ASTM C 1363. *Ciencia Unemi*, 9(21), 83-96.
- Molar-Orozco, M. E., & Huelsz-Lebros, G. (2017). Comparación del comportamiento térmico de muros de concreto armado y de bloques de concreto huecos. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 1(22), 1-11.
- Monjo Carrió, J. (septiembre-octubre/noviembre-diciembre de 2005). La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización. *Informes de construcción*, 57(499-500), 37-54.
- Monjo Carrió, J. (2005). la evolución de los sistemas constructivos en la edificación. procedimientos para su industrialización. *Infomes de la Construcción*, 57(499-500), 37-54.
- Mosquera Arancibia, P. (2013). *Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida*. Madrid: Universidad politécnica de Madrid.
- Navarro Mendoza, E. G. (2019). *Cal de alta pureza en polvo como material alternativo en los procesos de restauración*. Morelia: Tesis para obtener el grado de maestro en arquitectura, Universidad Michoacana de SAN Nicolas de Hidalgo.
- Navarro Mendoza, E. G., & et al. (2020). High Purity Lime as an Ecologic Alternative or Construction Mortars and Pastes. *Key Engineering Materials*, 188-192.
- Navarro Mendoza, E. G., Alonso Guzmán, E. M., Sanchez Calvillo, A., Bedolla Arroyo, J. A., Becerra Santacruz, H., Navarro Ezquerro, A., y otros. (2023). Physical and Mechanical Characterization of Lime Pastes and Mortars for Use in Restoration. *Heritage*, 2582-2600.
- Navarro Mendoza, E., Alonso Guzmán, E. M., & Bedolla Arroyo, J. A. (2019). La cal en México. Su historia y su presente. En *Tercer congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la construcción* (págs. 767-772). Ciudad de México: Universidad Nacional Autonoma de México .
- NMX-C-486-ONNCCE-2014. (2014). *Industria de la construcción-Mapotería- Mortero para uso estructural- especificaciones y métodos de ensayo*. Organismo

Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.

Nogueira, R., Ferreira Pinto, A. P., & Gomes, A. (2020). Artificial ageing by salt crystallization: test protocol and salt distribution patterns in lime-based rendering mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 1-13.

Nope Gómez, F. I., & De Santiago, C. (2014). Medida de la conductividad térmica del suelo en laboratorio. Fundamentos físico, aplicaciones geotérmicas y relaciones con otros parámetros del suelo. *Ingeniería Civil*, 175, 97-104.

Norambuena-Contreras, J., Quilodran, J., Gonzalez-Torre, I., Chavez, M., & Borinaga-Trevino, R. (2018). Electrical and thermal characterisation of cement-based mortars containing recycled metallic waste. *Journal of Cleaner Production*, 737-751.

Ordóñez García, A. (02 de Enero de 2021). Nivel de masa térmica. Recuperado el Febrero de 2021, de Seis Cubos: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/nivel-de-masa-termica#:~:text=El%20retraso%20t%C3%A9rmico%2C%20tambi%C3%A9n%20conocido,cerramiento%2C%20generalmente%20medido%20en%20horas.>

Padovnik, A., & Bokan-Bosiljkov, V. (2021). The Influence of Dry Hydrated Limes on the Fresh and Hardened Properties of Architectural Injection Grout. *Materials*, 1-15.

Pastor Villa, R. M. (2018). *Cálculo de la transmitancia térmica de un muro de fachada*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Quintero Ortíz, L. A., Herrera, J., Corzo, L., & García, J. (2011). Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluada a partir de parámetros ultrasónicos. *ION*, 24(1), 69-76.

Reis, J., & Carneiro, E. (2011). Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. *Construction and Buildings Materials*, 107-111.

Ricciu, R., Besalduch, L. A., Galatioto, A., & Ciulla, G. (2017). Thermal characterization of insulating materials. *Renewable and sustainable energy reviews*, 1-8.

Rodríguez-Muñoz, N. A., Nájera-Trejo, M., & Martín-Domínguez, I. R. (2018). Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 279-289.

- Roux Gutiérrez, R. S., & Gallegos Sánchez, D. P. (2015). Construcción sustentable, análisis de retraso térmico a bloques de tierra comprimidos. *Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, IX(11), 59-71.
- Salamanca Correa, R. (2001). La tecnología de los morteros. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 41-48.
- Santos W, J., Carrasco E, V., Mantilla J, N., Piancastelli E, M., Magalhaes A, G., Silva F, J., y otros. (2019). Study of the effects of excessive cement oflimein mechanical properties and durability of the mortar coating. *International Journal of Development Research*, 29923-29927.
- Santos, A. R., Veiga, M. d., Silva, A. S., de Brito, J., & Álvarez, J. I. (2018). Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. *Construction and Building Materials*, 907-922.
- Santos, T., Nunes, L., & Faria, P. (2017). Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility. *Journal of Cleaner Production*, 55-67.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes Intituto Mexicano del Transporte. (2006). *Durabilidad de la infraestructura concreto reforzado expuesta a difereentes ambientes urbanos de México*. Querétaro: IMT.
- SEDATU, C. (2017). *Código de Edificación de Vivienda*. Ciudad de Mexico: Gobierno de México.
- Soon-Ching, N., Kaw-Sai, L., & Ngee-Heng, T. (2010). Thermal inertia of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall anels: Experimental study. *Energy and buildings*, 2956-2960.
- Spósito, F. A., Higuti, R. T., Tashima, M. M., Akasaki, J. L., Melges, J. P., Assuncao, C. C., y otros. (2020). Incorporation of PETwastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime. *Journal of Building Enrineering*, 1-11.
- Stefanidou, M., Assael, M., Antoniadis, K., & Matziaroglou, G. (2010). Thermal Conductivity of Building Materials Employed in the Preservation of Traditional Structures. *nt J Thermophys*, 844-851.
- Stukovnik, P., Bkan Bosiljkov, V., & Marinsek, M. (2020). Alkali-dolomite reaction in air lime mortar – implications for. *Journal of Cultural Heritage*, online.

- Subdirección Coporativa de Administración, D. C. (s.f.). *Especificaciones generales de construcción*. Ciudad de México: Casa de Moneda México.
- Vejmelková, E., Keppert, M., Kersner, Z., Rovnaníková, P., & Cerný, R. (2012). Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 22-28.
- Velázquez Pérez, J. A., Alonso Guzmán, E. M., Martínez Molina, W., Chávez García, H. L., & Arreola Sánchez, M. (2017). Influence of inorganic and organic additives on spectrophotometry of lime mortars. *GE-conservacion*, 292-299.
- Velázquez Perez, J. A., Martínez Molina, W., Chávez García, H. L., Alonso Guzmán, E. M., & Ruiz Ruiz, R. (2017). Effective Porosity Comparison with a Lime Mortar Matrix Base during 350 to 700 days. *Materials Science Forum*, 60-64.
- Villaseñor, I., & Schneider, R. (2013). Principios generales para la elaboración de argamasas. En L. Barba Pingarrón , & I. Villaseñor Alonso, *La cal: historia, propiedades y uso* (págs. 97-114). Distrito Federal: UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas, Asociación Nacional de Fabricantes de Cal, A.C.
- Zamora Ferrer, A. (2012). *Aplicación de recubrimiento de mortero en muros de edificaciones*. Santa Clara: (Trabajo de diploma), Facultad de construcciones- departamento de Ingeniería civil.
- Zoma, F., Yonli, F. H., Malbila, E., Toguyeni, D. Y., & Hassel, I. B. (2020). Adding hydrated lime in material made of clayey soil and fibres: Formulation and effects on thermo-mechanical properties. *Journal of Minerals and Materials Characterization and engineering*, 8, 149-161.

## Anexo I

## Caja caliente construida

Durante el proceso de investigación para evaluar las propiedades térmicas de los materiales, se encontró que es viable construir una caja experimental que proporcionen datos relevantes. Con este propósito, se desarrolló una caja caliente calibrada para realizar pruebas y mediciones necesarias.

La construcción de la caja caliente sigue los lineamientos establecidos en la Norma C 1363-97. Esta norma define el método de prueba para medir la transferencia de calor a través de condiciones controladas de radiación térmica, temperatura del aire y velocidad del aire dentro de una cámara, además de establecer los requisitos generales para su construcción y operación.

La caja caliente se utiliza para probar muestras homogéneas o no homogéneas de elementos de construcción, y estas muestras deben ser representativas y tener el tamaño adecuado para el aparato. Se consideran condiciones que duplican las condiciones extremas en zonas templadas, variando entre  $-48^{\circ}\text{C}$  y  $85^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura interior de la vivienda de  $21^{\circ}\text{C}$ . Además, las muestras deben estar en condiciones normales de alrededor de  $23^{\circ}\text{C}$  y 50% de humedad, lo cual es ideal para las pruebas realizadas en la ciudad de Morelia.

El método permite operar en condiciones de convección forzada y natural sobre la superficie de la muestra, y es posible medir elementos de construcción individuales más pequeños que el área de medición. La constante de tiempo térmica se puede aproximar a partir del conocimiento de las difusividades térmicas de los componentes del sistema, pero también puede determinarse experimentalmente. Es importante mencionar que la constante de tiempo térmica representa el tiempo necesario para alcanzar el 37% de la temperatura final.

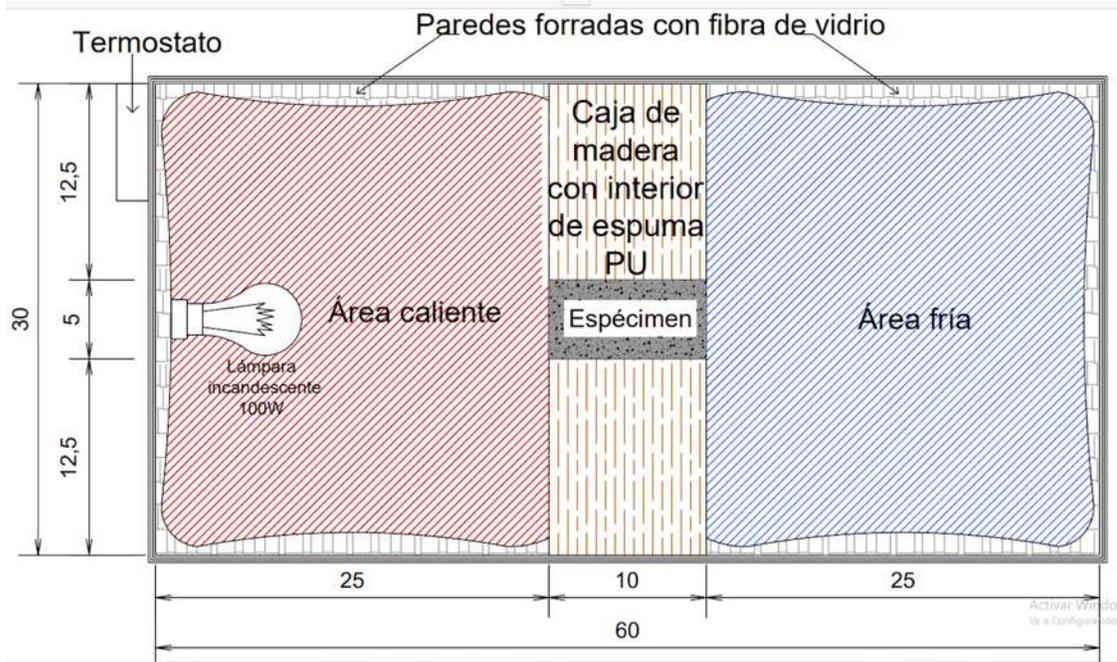


Figura 66. Materiales empleados, medidas en mm. Realizado por el autor-

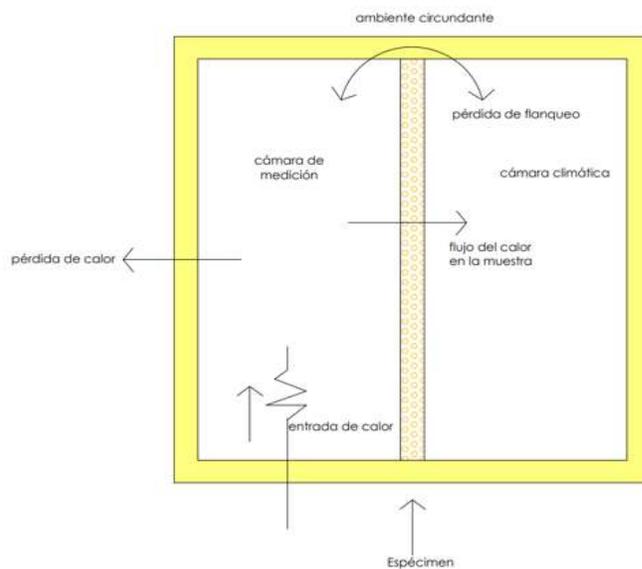


Figura 67. Ejemplo de un aparato calibrado para transferencia de calor horizontal, (ASTM C1363)

El propósito de la cámara de medición es tener un control de la medición de temperatura.



Figura 68. Caja caliente construida. Foto tomada por el autor.

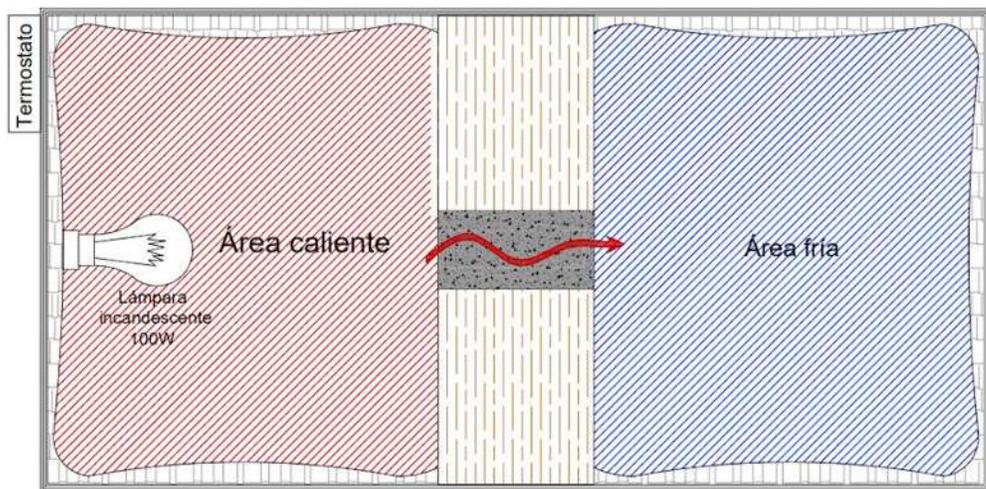


Figura 69. Esquema de propuesta de caja caliente. Realizado por el autor.



**Figura 70. Tapas para aislar el área. Foto tomada por el autor.**

Para garantizar una correcta ubicación de los termopares, se recomienda colocar como mínimo cinco por metro cuadrado del área de la pared que se va a medir, y deben estar ubicados en el centro de cada sección. Es importante tomar precauciones para evitar pérdidas de calor durante la instalación de los termopares.

El tiempo necesario para llevar a cabo las pruebas se determina considerando la velocidad de respuesta del aparato de prueba y la respuesta del entorno. En la primera etapa de las pruebas, se mantuvo la temperatura durante seis horas y luego se tomaron mediciones durante seis horas después del apagado para medir la disminución de la temperatura. Este procedimiento permite obtener datos precisos y confiables sobre el comportamiento térmico de los materiales.

## Equipos

Los equipos de medición que se utilizaron fueron:

### Logger de datos HOBO U12-006

Logger manejable para valores de medición (registrador de datos) con 4 canales externos.



Figura 71. Logger de datos HOBO U12-006. Foto tomada por el autor.

Especificaciones técnicas

Memoria

43000 valores (total)

Transmisión de datos

USB (download completo en 30 segundos)

Condiciones ambientales

-20... + 70°C

Rango de medición

-40 ... + 100°C

Precisión

+/- 0.5°C a 20°C

Resolución

0.41° C a 20 °C

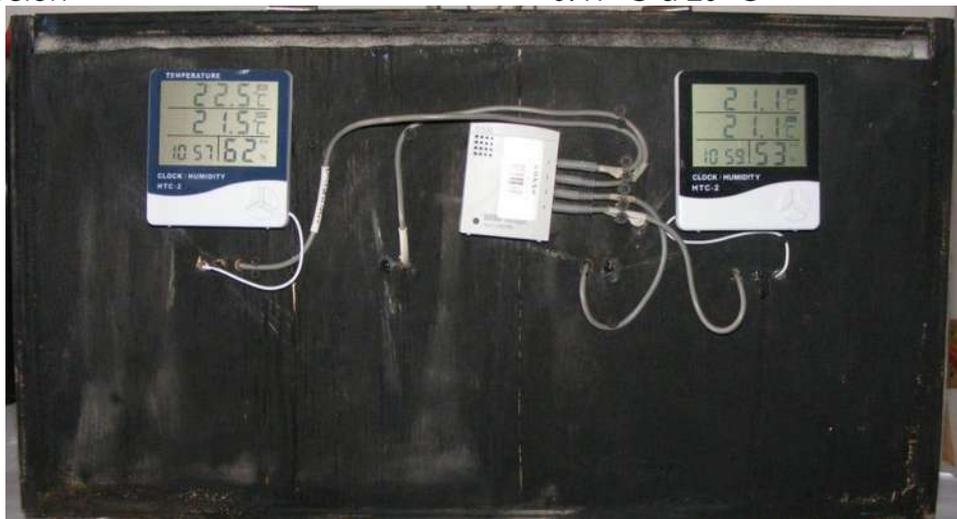


Figura 72. Ubicación del Hobo U12-006 en la caja. Foto tomada por el autor.

## LOGGER H8-004-02

Se utiliza un registrador de datos de cuatro canales con sensores internos de temperatura, intensidad de luz y humedad relativa, que pueden ser reemplazados por el usuario según sus necesidades. Además, cuenta con un canal externo que permite la conexión de una amplia variedad de sensores externos. Esta versatilidad y capacidad de personalización del registrador lo convierten en una herramienta útil y adaptable para la recopilación de datos en diversas aplicaciones.



Figura 73. LOGGER H8-004-02 Foto tomada por el autor.

### Especificaciones técnicas

Rango de operación	-20°C a +70°C/ 0-95% RH no condensada
Memoria	7944 valores
Condiciones ambientales	-40 a +75°C

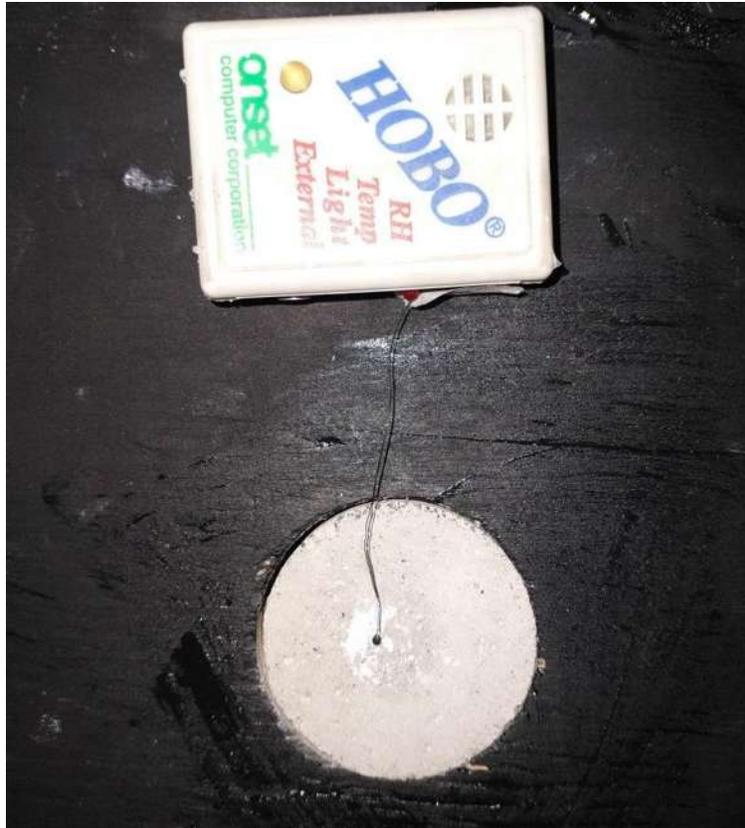


Figura 74. Ubicación de LOGGER H8-004-02. Foto tomada por el autor.



Figura 75. Ubicación del termopar en el espécimen. Foto tomada por el autor.

## Termostato Digital Control de Temperatura Mh1210w



Figura 76. Termostato Digital. Foto tomada por el autor.

### Especificaciones técnicas

Tensión de trabajo:	110~220 VCA +- %, 50 /60 HZ
Corriente nominal	10A
Salida relay	10 <sup>o</sup> /220 VCA
Consumo de energía	=3 W
Rango de medida:	-40~120°C
Medición de precisión	+0.1 °C
Error de medición	+ 0.3°C
Rango de control	-40 ~120°C
Control de precisión	1°C
Temperatura de trabajo	-20~70°C
Sensor de temperatura	NTC 25°C = 10K b3435
Humedad	90% sin condensación

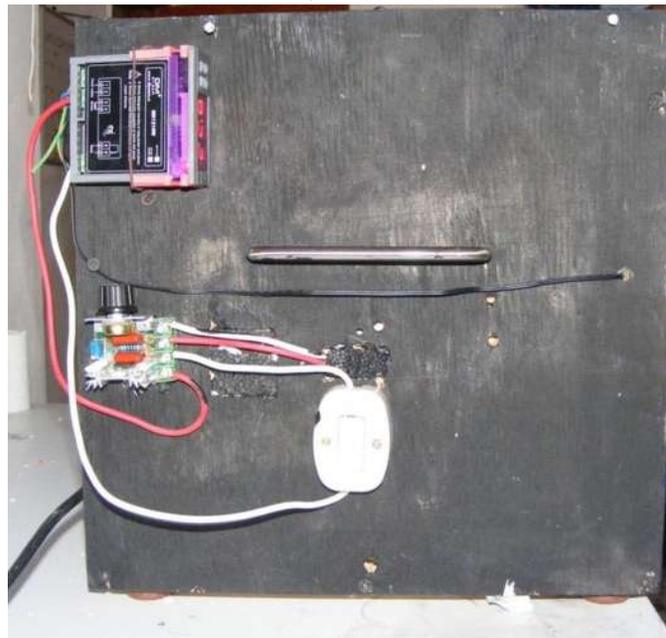


Figura 77. Termostato, dimmer y switch. Foto tomada por el autor.

## HTC2-termómetro

Higrómetro, des/Termómetro ambiental/pertador/Termo higrómetro Calibrado /Termómetro Ambianta



Figura 78. HTC2-termómetro. Foto tomada por el autor.

### Especificaciones técnicas

Rango de medición de temperatura interior	-10°C~+50°C
Rango de medición de temperatura exterior	-10°C~+50°C
Precisión de la medición de temperatura	+1°C
Resolución de temperatura	0.1 °C
Rango de medición de humedad	10%RH~99%RH
Precisión de la medición de humedad	+5%RH (40%~80%)
Resolución de humedad	1%
Condiciones de almacenamiento	-10°C~+60°C, 20%~80%

Los termopares deben instalarse de manera uniforme al ras o debajo de las superficies para obtener mediciones precisas de temperatura. En el caso específico de la caja, se colocó el termopar sobre la superficie del espécimen utilizando pasta de alta conductividad térmica para asegurar una buena adhesión del termopar. Esta técnica garantiza una correcta transmisión del calor entre la superficie del espécimen y el termopar, lo que resulta en mediciones más confiables y representativas de la temperatura.



Figura 79. Pasta de alta conductividad.



Figura 80. Especificaciones de la pasta.

El tamaño de la muestra debe ser igual al del aparato para garantizar mediciones precisas y representativas. Sin embargo, también es posible probar elementos más pequeños utilizando un envoltorio adecuado para completar el tamaño requerido. En el caso de la caja construida, se diseñó una probeta de madera con espuma PU para mantener el aislamiento térmico y asegurar que las mediciones reflejen las condiciones reales de la muestra. Este enfoque permite adaptar el tamaño de la muestra al aparato de prueba y obtener resultados confiables en materia de transferencia de calor y comportamiento térmico.



Figura 81. Panel envolvente. Foto tomada por el autor.



Figura 82. Panel envolvente con espuma PU. Foto tomada por el autor.



**Figura 83. Termopares en el espécimen. Foto tomada por el autor.**

Se decidió utilizar probetas cilíndricas de mortero con dimensiones de 5 centímetros de diámetro por 10 centímetros de alto para llevar a cabo las pruebas. Estos cilindros son ampliamente utilizados en la industria para medir la resistencia a la compresión de los morteros (NMX-C085, 2010). Al utilizar este tipo de probetas, se busca obtener resultados confiables y consistentes que reflejen las propiedades mecánicas del mortero en estudio, lo cual es crucial para comprender su comportamiento térmico y evaluar su eficiencia como material de construcción.



Figura 84. Probeta cilíndrica de 5 x 10 centímetros. Foto tomada por el autor.

## Tiempo de prueba

El tiempo de exposición del espécimen a la fuente de calor se determinó en función de la caracterización climática de la ciudad de Morelia (anexo II), lo cual arrojó que un período de seis horas a una temperatura de alrededor de 25°C sería apropiado para obtener una prueba realista. Esta duración y temperatura de exposición permiten simular condiciones reales y representativas de la ciudad, lo que garantiza resultados más precisos y significativos para evaluar el comportamiento térmico del material en estudio.

## Resultados de los morteros probados en la caja caliente

Dentro de la caja caliente, se utilizaron las siguientes claves para comprender los datos obtenidos:

Tabla 54. Esquema de propuesta de caja caliente.

CLAVE	Nombre	Ubicación
C	Caliente	Temperatura del sensor en el espécimen en el área caliente.
F	Frío	Temperatura del sensor en el espécimen en el área fría.
EC	Espécimen C	Temperatura del sensor cerca del espécimen en el área caliente
EF	Espécimen F	Temperatura del sensor cerca del espécimen en el área fría
Área C	Área caliente	Temperatura de área caliente en el opuesto del espécimen
Área F	Área fría	Temperatura de área fría en el opuesto del espécimen

Estas claves ayudan a identificar y distinguir las mediciones de temperatura tomadas en diferentes ubicaciones dentro de la caja caliente, lo que es crucial para el análisis y comprensión de los datos obtenidos durante las pruebas térmicas.

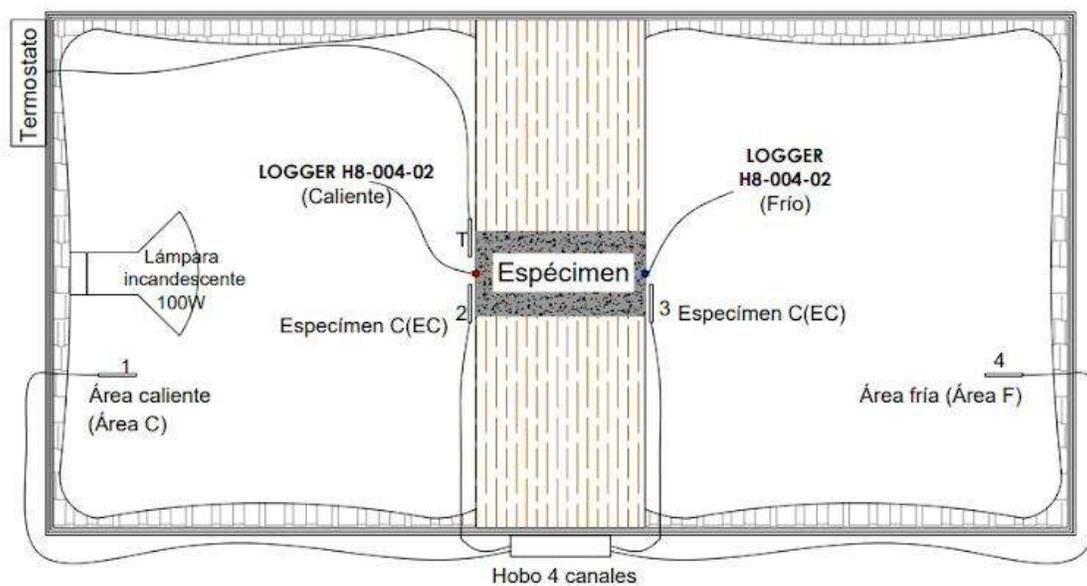


Figura 85. Ubicación de los sensores de temperatura y claves. Realizado por el autor

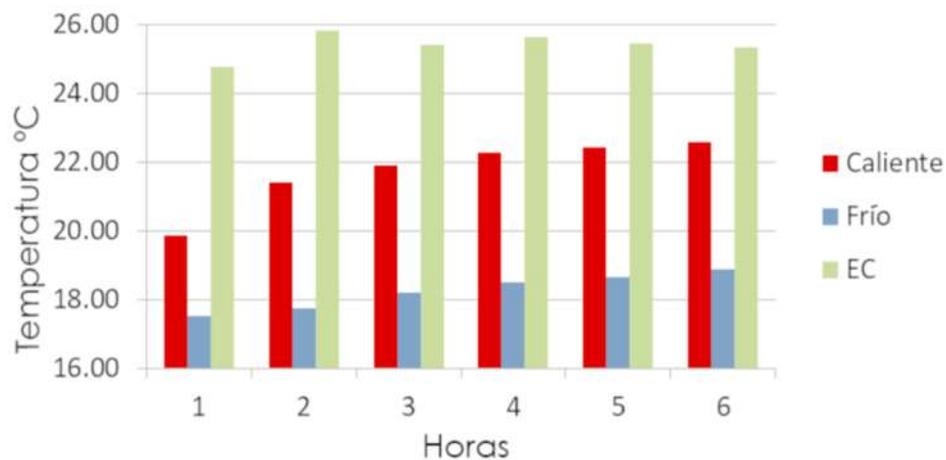
## Cal de construcción y arena volcánica (CC)

### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora ( ) durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

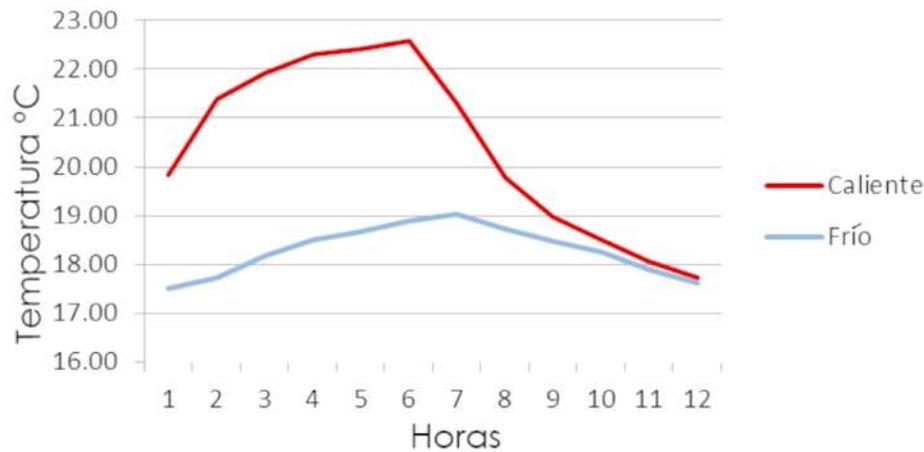
**Tabla 55. Resultados CC I promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.84	17.52	23.77	24.77	17.78	17.69	2.32
2	21.39	17.74	24.64	25.82	17.95	17.80	3.65
3	21.90	18.19	24.32	25.40	18.22	17.95	3.72
4	22.29	18.50	24.55	25.63	18.41	18.02	3.78
5	22.42	18.66	24.34	25.42	18.56	18.14	3.76
6	22.57	18.88	24.28	25.34	18.70	18.25	3.69
<b>PROM</b>	21.73	18.25	24.31	25.40	18.27	17.97	3.49



**Gráfico. 13. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC I durante las seis horas.**

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 14. Diferencia de temperaturas CC I.**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 56. Amortiguamiento térmico CC I.**

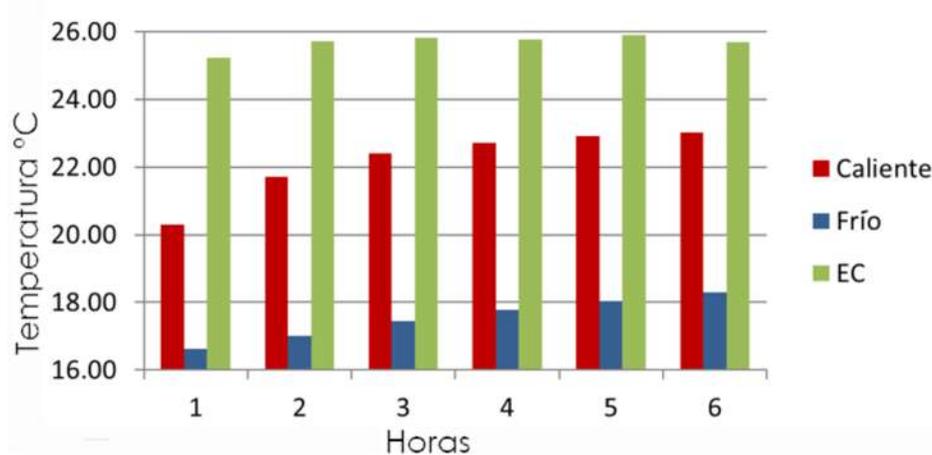
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.57	18.88	
Temperatura mínima	19.84	17.52	
Diferencia	2.73	1.36	0.50

## Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

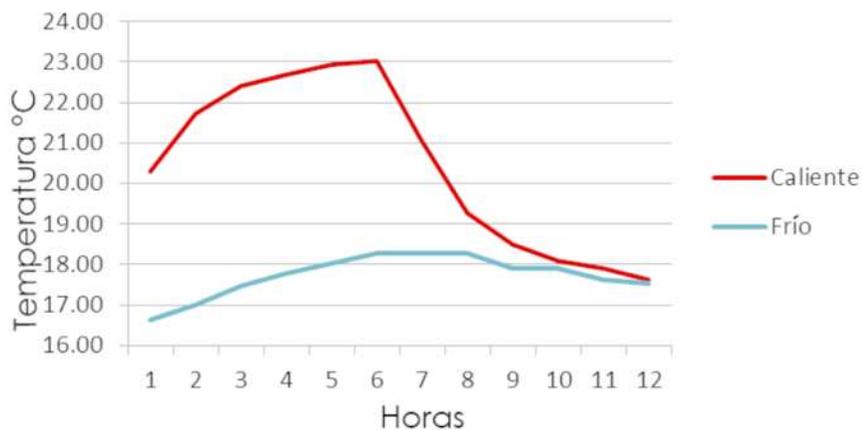
**Tabla 57. Resultados CC II promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	20.28	16.63	23.52	25.23	16.90	16.88	3.65
2	21.71	17.01	23.92	25.71	17.05	17.00	4.70
3	22.41	17.46	24.13	25.82	17.27	17.14	4.96
4	22.70	17.77	24.12	25.77	17.47	17.31	4.93
5	22.92	18.03	24.27	25.89	17.64	17.46	4.90
6	23.02	18.28	24.09	25.69	17.73	17.52	4.74
<b>PROM</b>	22.18	17.53	24.01	25.68	17.34	17.22	4.64



**Gráfico. 15. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC II durante las seis horas**

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 16. Diferencia de temperaturas CCII**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 58. Amortiguamiento térmico CC II

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	23.02	18.23	
Temperatura mínima	20.28	16.63	
Diferencia	2.74	1.6	0.58

### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora ( ) durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 59. Resultados CC III promedios por seis horas con fuente de calor.

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	18.95	16.38	22.15	23.55	16.66	16.61	2.57
2	20.92	16.57	23.55	25.33	16.78	16.68	4.35
3	21.84	17.08	24.03	25.72	17.05	16.82	4.76
4	22.22	17.49	24.05	25.67	17.28	16.96	4.73
5	22.41	17.65	23.88	25.48	17.47	17.10	4.77
6	22.54	17.90	24.03	25.60	17.63	17.23	4.64
PROM	21.48	17.18	23.62	25.23	17.14	16.90	4.30

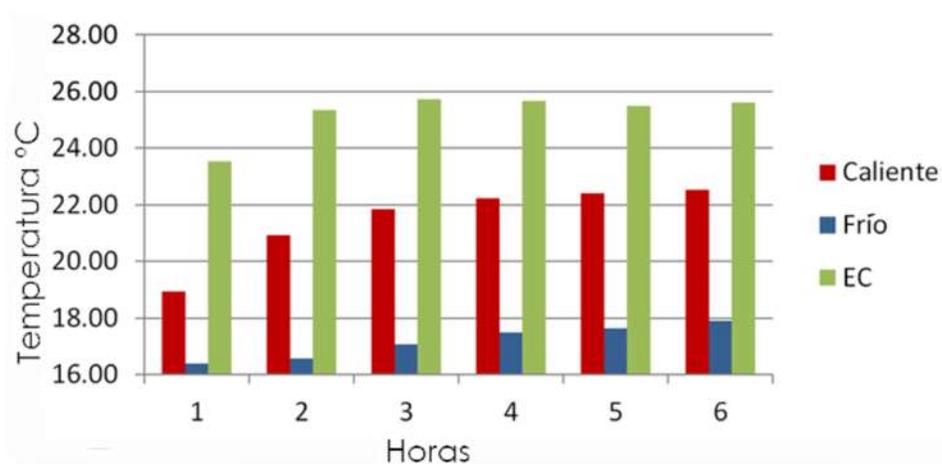


Gráfico. 17. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC III durante las seis horas.

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.

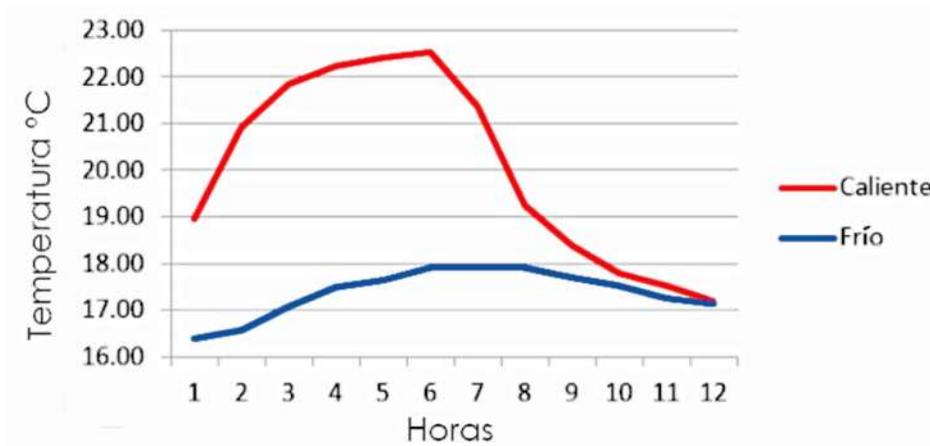


Gráfico. 18. Diferencia de temperaturas CCIII.

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 60. Amortiguamiento térmico CC III

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.54	17.9	
Temperatura mínima	18.95	16.38	
Diferencia	3.59	1.52	0.42

## Cal con contenido de hidróxido de calcio 90% y arena volcánica (CAP90)

### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 61. Resultados CAP 90 I promedios por seis horas con fuente de calor.

Hora	Caliente	Frio	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.97	17.43	23.84	25.27	17.79	17.82	2.54
2	21.43	17.77	24.11	25.59	18.00	18.00	3.65
3	22.09	18.34	24.27	25.69	18.22	18.14	3.75
4	22.48	18.66	24.23	25.58	18.35	18.22	3.82
5	22.70	18.91	24.41	25.79	18.43	18.27	3.79
6	22.86	19.04	24.47	25.83	18.49	18.32	3.82
<b>PROM</b>	21.92	18.36	24.22	25.63	18.21	18.13	3.56

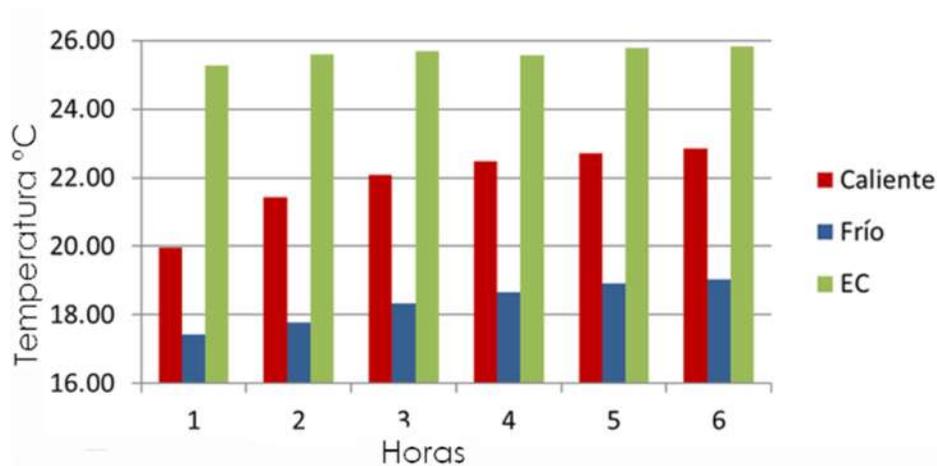


Gráfico. 19. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 90 I durante las seis horas

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.

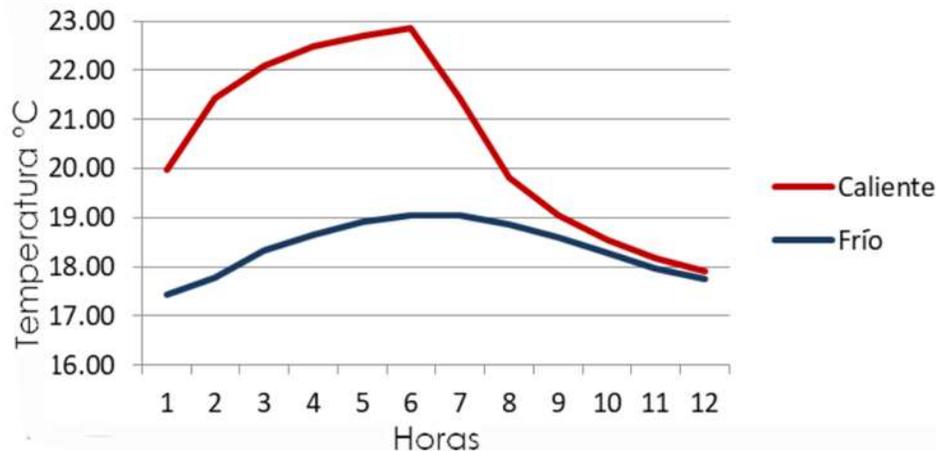


Gráfico. 20. Diferencia de temperaturas CAP 90 I.

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 62. Amortiguamiento térmico CAP90 I.

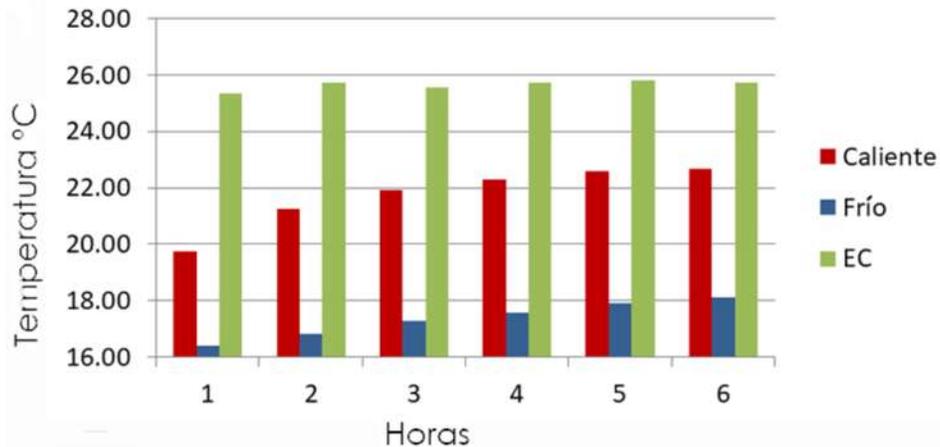
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.86	19.04	
Temperatura mínima	19.97	17.43	
Diferencia	2.89	1.61	0.56

### Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora ( ) durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

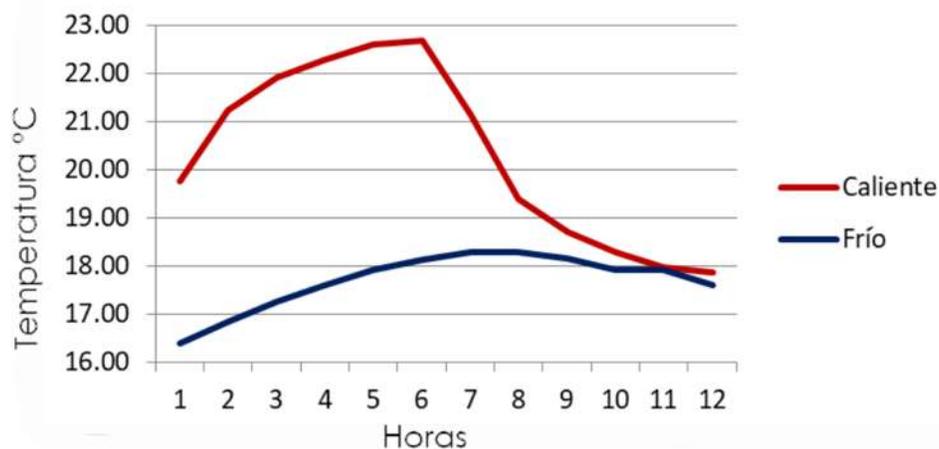
Tabla 63. Resultados CAP 90 II promedios por seis horas con fuente de calor

Hora	Caliente	Frio	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.74	16.38	23.74	25.34	16.77	16.75	3.36
2	21.24	16.82	23.97	25.71	16.90	16.84	4.41
3	21.90	17.27	23.92	25.55	17.13	17.01	4.63
4	22.29	17.58	24.10	25.72	17.34	17.19	4.70
5	22.61	17.90	24.22	25.82	17.54	17.37	4.71
6	22.67	18.12	24.18	25.74	17.71	17.54	4.55
<b>PROM</b>	21.74	17.35	24.02	25.65	17.23	17.12	4.39



**Gráfico. 21. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 90 II durante las seis horas**

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 22. Diferencia de temperaturas CAP 90 II.**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 64. Amortiguamiento térmico CAP90 II.**

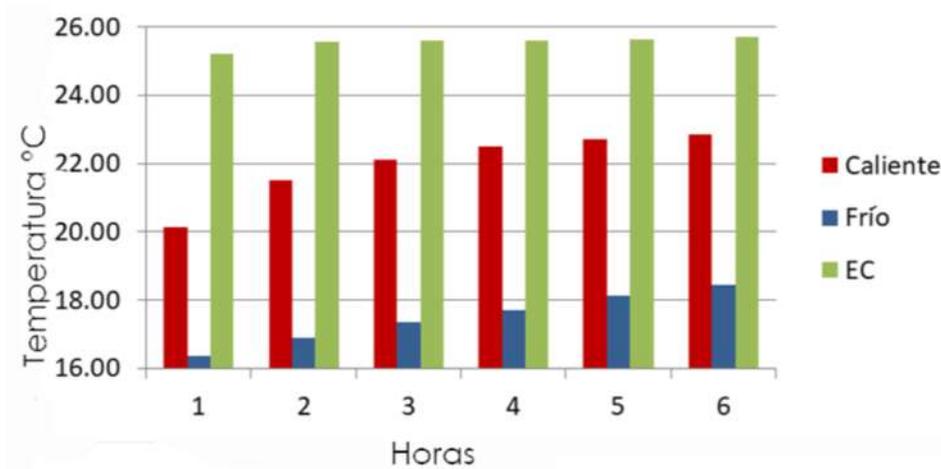
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.67	18.12	
Temperatura mínima	19.74	16.38	
Diferencia	2.93	1.74	0.59

### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora ( ) durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 65. Resultados CAP 90 III promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	20.13	16.38	24.01	25.22	16.80	16.77	3.75
2	21.52	16.89	24.16	25.57	16.91	16.89	4.63
3	22.13	17.36	24.22	25.60	17.13	17.08	4.76
4	22.51	17.71	24.24	25.60	17.39	17.34	4.80
5	22.70	18.12	24.32	25.64	17.73	17.72	4.58
6	22.86	18.44	24.46	25.69	18.07	18.05	4.42
<b>PROM</b>	21.97	17.48	24.24	25.55	17.34	17.31	4.49



**Gráfico. 23. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 90 III durante las seis horas.**

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.

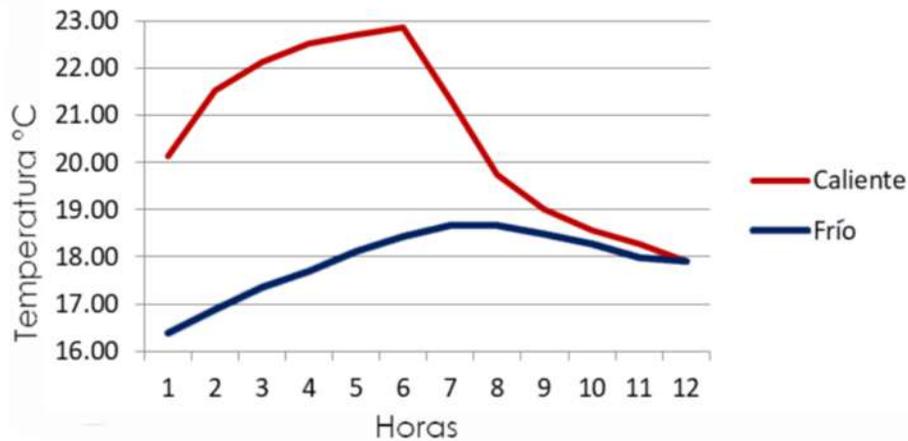


Gráfico. 24. Diferencia de temperaturas CAP 90 III

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 66. Amortiguamiento térmico CAP90 III.

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.86	18.44	
Temperatura mínima	20.13	16.38	
Diferencia	2.73	2.06	0.75

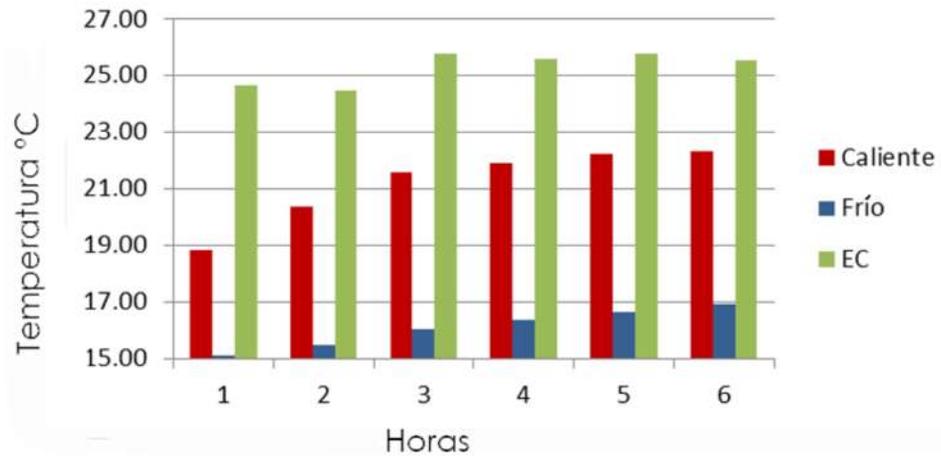
### Cal con contenido de hidróxido de calcio 95% y arena volcánica (CAP95)

#### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

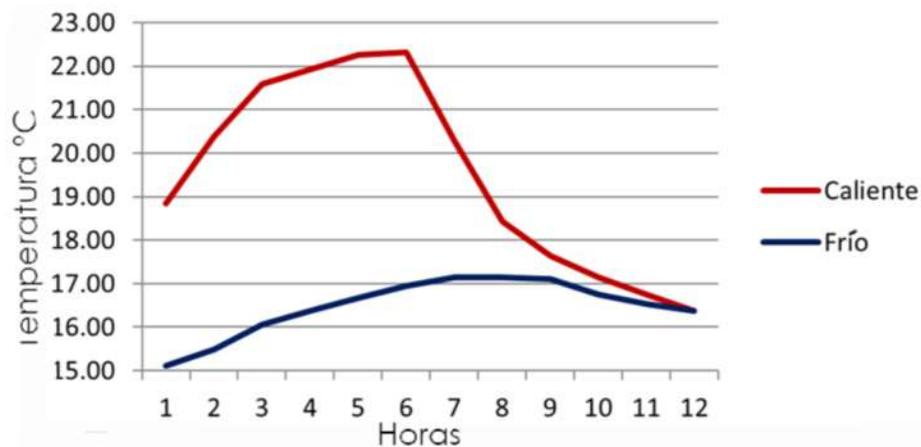
Tabla 67. Resultados CAP 95 I promedios por seis horas con fuente de calor.

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	18.85	15.10	22.65	24.65	15.43	15.44	3.75
2	20.38	15.49	22.48	24.48	15.55	15.49	4.89
3	21.58	16.06	23.79	25.77	15.74	15.60	5.52
4	21.93	16.38	23.65	25.61	15.90	15.71	5.55
5	22.25	16.67	23.82	25.76	16.05	15.86	5.59
6	22.32	16.95	23.61	25.54	16.31	16.15	5.37
PROM	21.22	16.11	23.33	25.30	15.83	15.71	5.11



**Gráfico. 25. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 95 I durante las seis horas**

La grafica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 26. Diferencia de temperaturas CAP 95 I.**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 68. Amortiguamiento térmico CAP95 I.**

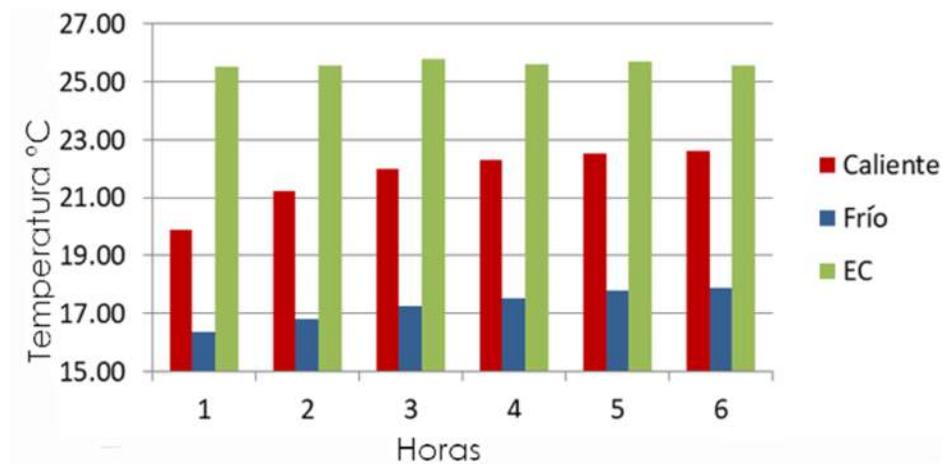
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.32	16.95	
Temperatura mínima	18.5	15.1	
Diferencia	3.82	1.85	0.48

## Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 69. Resultados CAP 95 II promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.90	16.38	23.86	25.54	16.79	16.74	3.52
2	21.24	16.82	23.77	25.56	16.92	16.86	4.41
3	22.00	17.27	24.07	25.81	17.13	17.00	4.73
4	22.32	17.52	23.95	25.63	17.32	17.16	4.80
5	22.54	17.81	24.03	25.70	17.48	17.29	4.74
6	22.61	17.90	23.94	25.58	17.61	17.42	4.71
<b>PROM</b>	21.77	17.28	23.94	25.64	17.21	17.08	4.48



**Gráfico. 27. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 95 II durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.

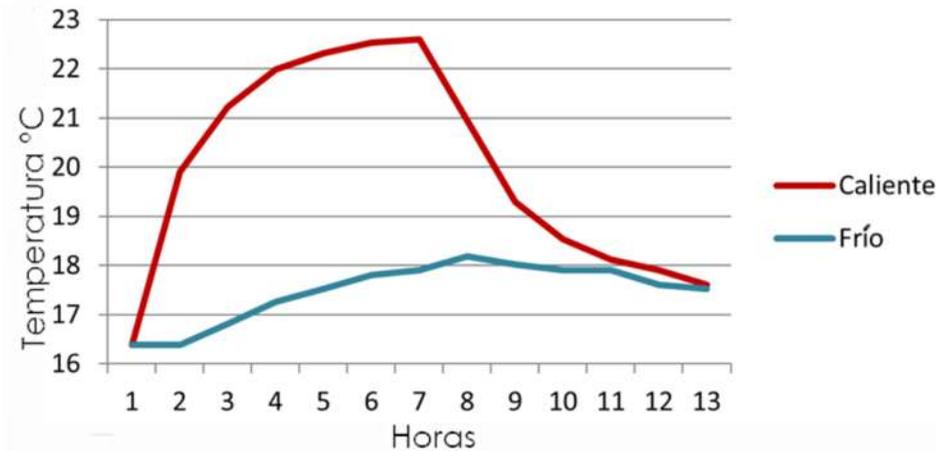


Gráfico. 28. Diferencia de temperaturas CAP 95 II

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 70. Amortiguamiento térmico CAP95 II

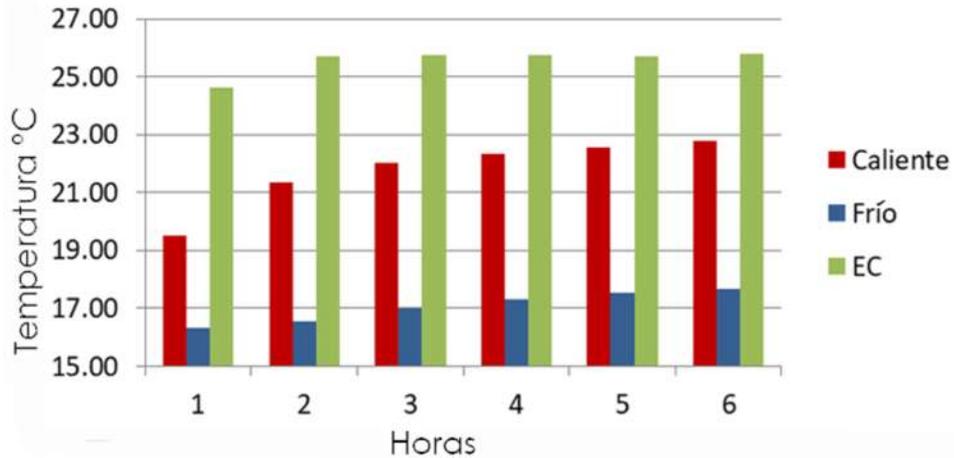
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.61	17.9	
Temperatura mínima	19.9	16.38	
Diferencia	2.71	1.52	0.56

### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora ( ) durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

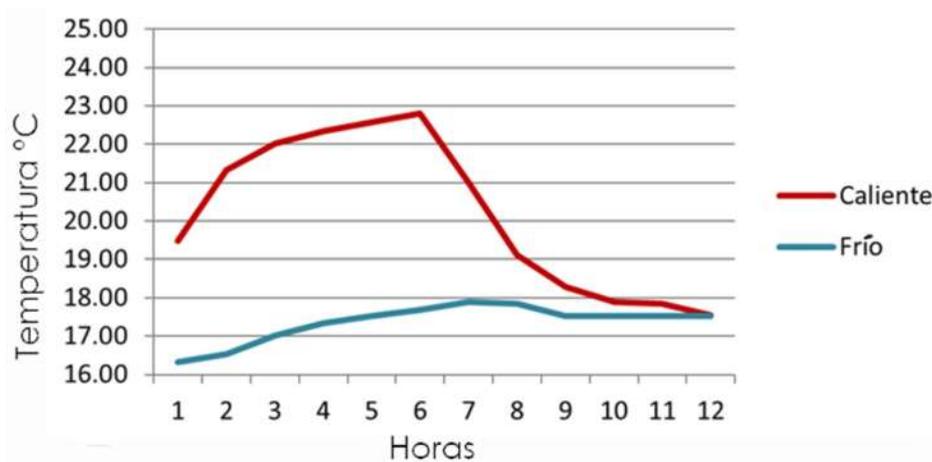
Tabla 71. Resultados CAP 95 III promedios por seis horas con fuente de calor.

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.49	16.32	23.01	24.62	16.53	16.46	3.17
2	21.33	16.54	23.98	25.70	16.63	16.55	4.79
3	22.03	17.01	24.13	25.74	16.85	16.71	5.02
4	22.35	17.33	24.15	25.74	17.05	16.86	5.02
5	22.57	17.52	24.14	25.72	17.22	17.01	5.05
6	22.80	17.68	24.27	25.81	17.36	17.13	5.12
PROM	21.76	17.07	23.95	25.56	16.94	16.79	4.70



**Gráfico. 29.**Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CAP 95 III durante las seis horas.

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 30.** Diferencia de temperaturas CAP 95 III

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 72.** Amortiguamiento térmico CAP95 III.

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.8	17.68	
Temperatura mínima	19.49	16.32	

Diferencia	3.31	1.36	0.41
------------	------	------	------

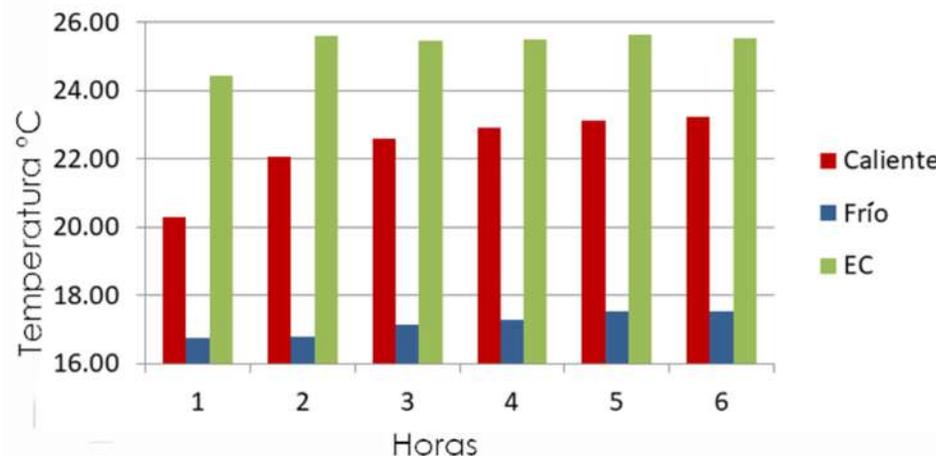
## Cal de construcción con PET (CC-P)

### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

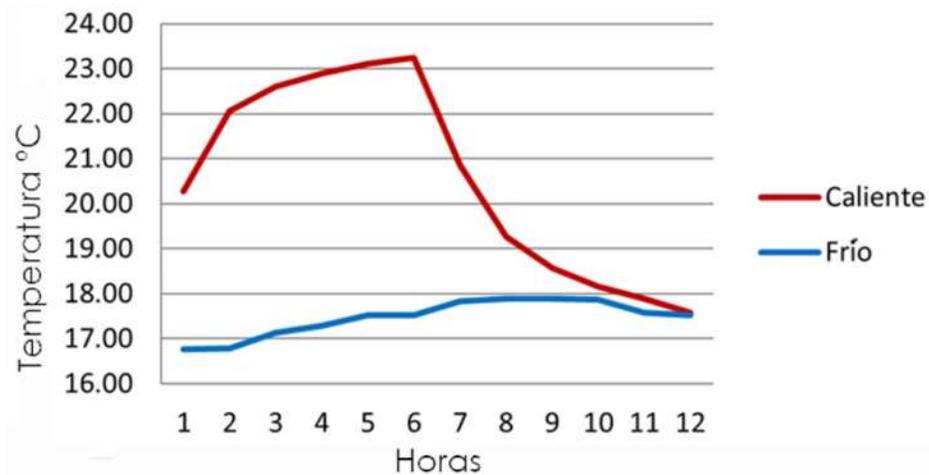
**Tabla 73. Resultados CC-P I promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	20.28	16.76	23.24	24.41	17.05	17.00	3.52
2	22.06	16.79	24.18	25.58	17.07	16.99	5.27
3	22.61	17.14	24.09	25.44	17.19	17.05	5.47
4	22.89	17.30	24.18	25.49	17.31	17.14	5.59
5	23.11	17.52	24.29	25.61	17.40	17.19	5.59
6	23.24	17.52	24.20	25.52	17.53	17.35	5.72
<b>PROM</b>	22.37	17.17	24.03	25.34	17.26	17.12	5.19



**Gráfico. 31. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC- P I durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 32. Diferencia de temperaturas CC-P I**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 74. Amortiguamiento térmico CC-P I.**

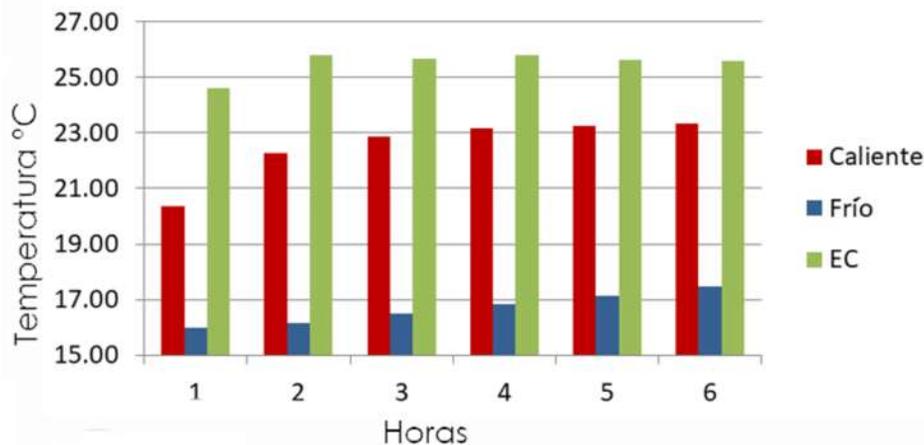
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	23.24	17.52	
Temperatura mínima	20.28	16.76	
Diferencia	2.96	0.76	0.26

### Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

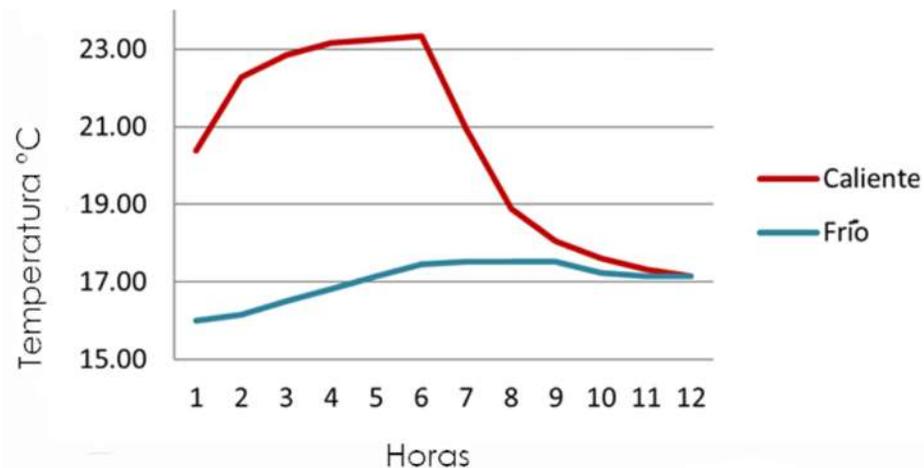
**Tabla 75. Resultados CC-P II promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	20.38	16.00	22.83	24.59	16.30	16.26	4.38
2	22.29	16.16	23.95	25.79	16.41	16.36	6.13
3	22.86	16.51	23.87	25.66	16.62	16.51	6.35
4	23.15	16.82	24.04	25.79	16.84	16.70	6.33
5	23.24	17.14	23.93	25.63	17.11	16.98	6.10
6	23.34	17.46	23.92	25.57	17.31	17.16	5.88
<b>PROM</b>	22.54	16.68	23.76	25.50	16.77	16.66	5.86



**Gráfico. 33. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC- P II durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 34. Diferencia de temperaturas CC-P II.**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 76. Amortiguamiento térmico CC-P II.**

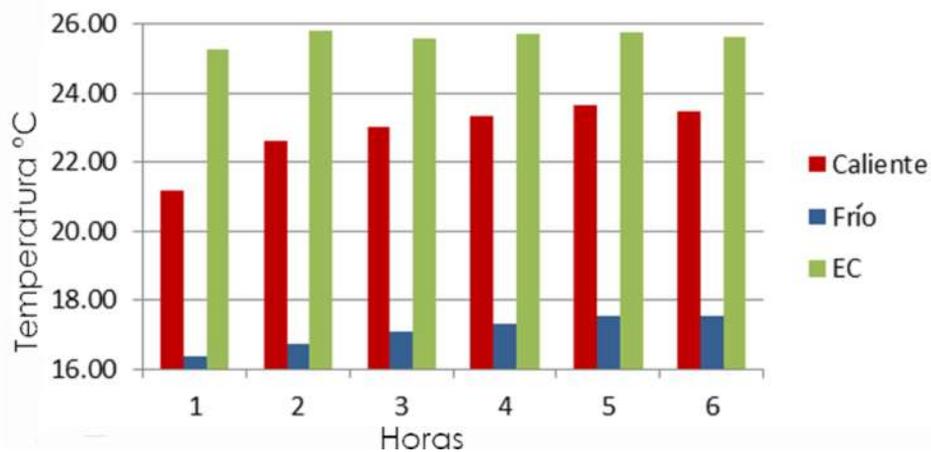
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	23.34	17.46	
Temperatura mínima	20.38	16	
Diferencia	2.96	1.46	0.49

### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora ( ) durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 77. Resultados CC-P III promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	21.17	16.38	23.64	25.25	16.89	16.86	4.79
2	22.60	16.73	24.11	25.82	17.03	16.97	5.88
3	23.02	17.08	23.97	25.60	17.26	17.16	5.94
4	23.31	17.30	24.14	25.71	17.45	17.30	6.01
5	23.66	17.52	24.20	25.77	17.57	17.37	6.14
6	23.47	17.52	24.05	25.61	17.65	17.42	5.95
<b>PROM</b>	22.87	17.09	24.02	25.63	17.31	17.18	5.78



**Gráfico. 35. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC- P III durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.

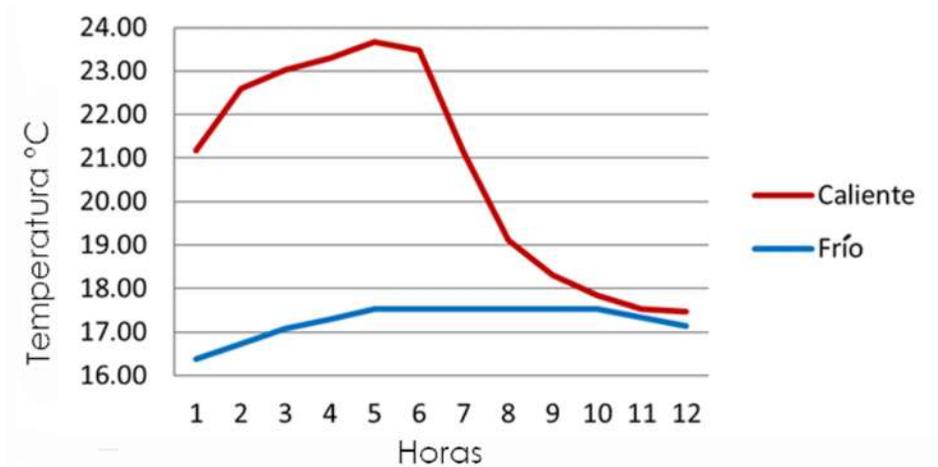


Gráfico. 36. Diferencia de temperaturas CC-P III.

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 78. Amortiguamiento térmico CC-P III.

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	23.47	17.52	
Temperatura mínima	21.17	16.38	
Diferencia	2.3	1.14	0.50

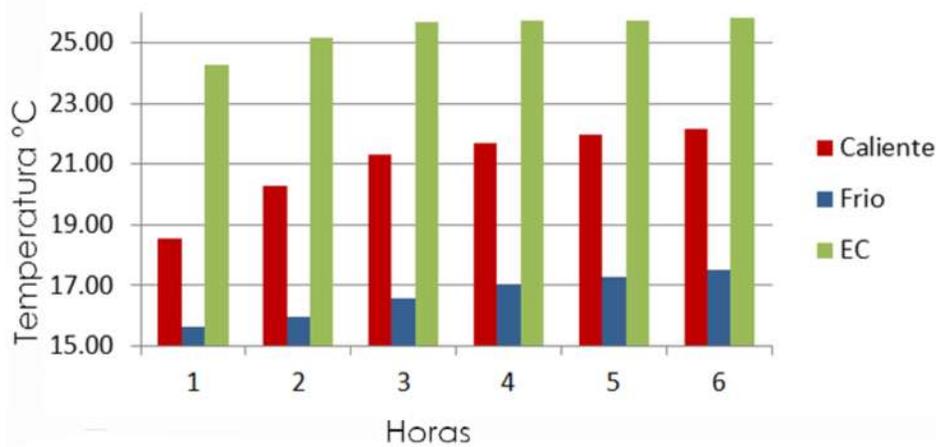
## Cal de construcción- arena volcánica – carbonato de calcio (CC-CC)

### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

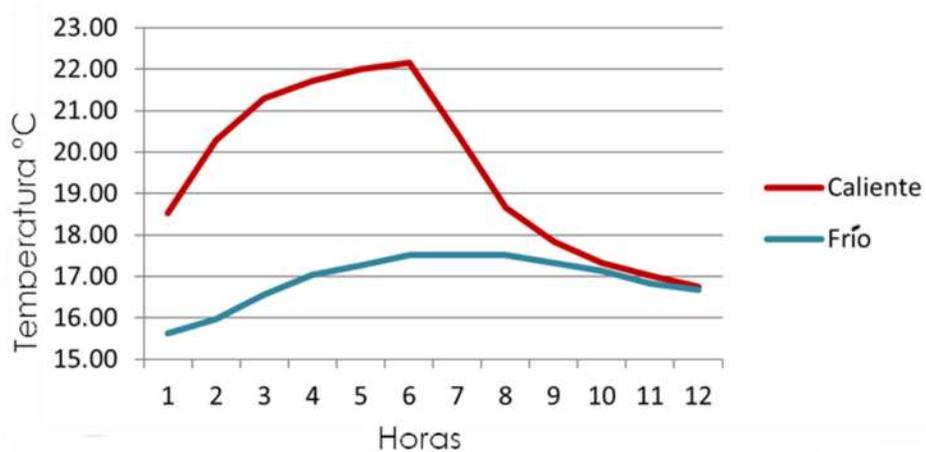
Tabla 79. Resultados CC-CC I promedios por seis horas con fuente de calor.

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	18.53	15.62	22.56	24.29	15.82	15.80	2.91
2	20.28	15.97	23.28	25.16	15.99	15.94	4.32
3	21.30	16.57	23.87	25.69	16.24	16.12	4.73
4	21.71	17.05	23.94	25.73	16.43	16.25	4.67
5	22.00	17.27	23.93	25.72	16.58	16.38	4.73
6	22.16	17.52	24.03	25.80	16.73	16.52	4.64
<b>PROM</b>	21.00	16.67	23.60	25.40	16.30	16.17	4.33



**Gráfico. 37. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-CC I durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 38. Diferencia de temperaturas CC-CC I**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 80. Amortiguamiento térmico CC-CC I.**

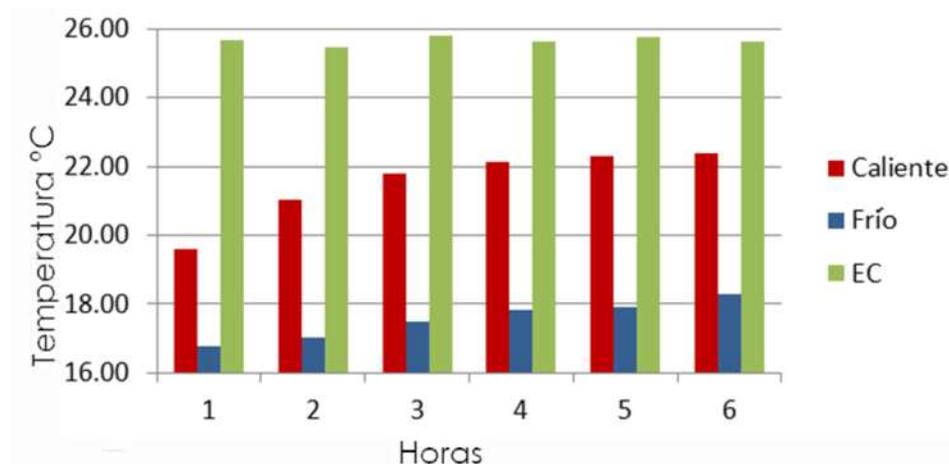
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.16	17.52	
Temperatura mínima	18.53	15.62	
Diferencia	3.63	1.9	0.52

### Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

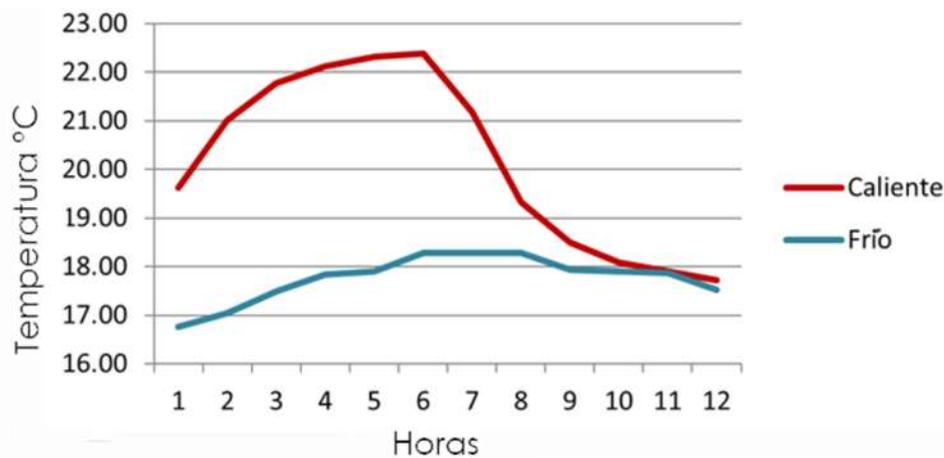
**Tabla 81. Resultados CC-CC II promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.62	16.76	24.03	25.68	16.89	16.83	2.86
2	21.01	17.05	23.68	25.45	16.97	16.89	3.97
3	21.77	17.49	24.08	25.78	17.14	17.00	4.29
4	22.12	17.84	23.97	25.61	17.29	17.11	4.29
5	22.32	17.90	24.09	25.74	17.41	17.20	4.42
6	22.38	18.28	23.99	25.62	17.51	17.28	4.10
<b>PROM</b>	21.54	17.55	23.97	25.65	17.20	17.05	3.99



**Gráfico. 39. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-CC II durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 40 Diferencia de temperaturas CC-CC II**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 82. Amortiguamiento térmico CC-CC II.**

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.38	18.28	
Temperatura mínima	19.62	16.76	
Diferencia	2.76	1.52	0.55

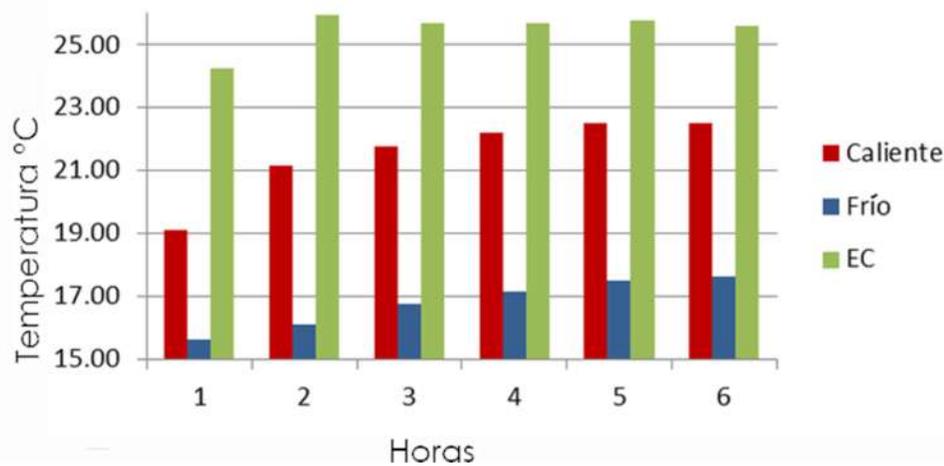
### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 83. Resultados CC-CC III promedios por seis horas con fuente de calor.**

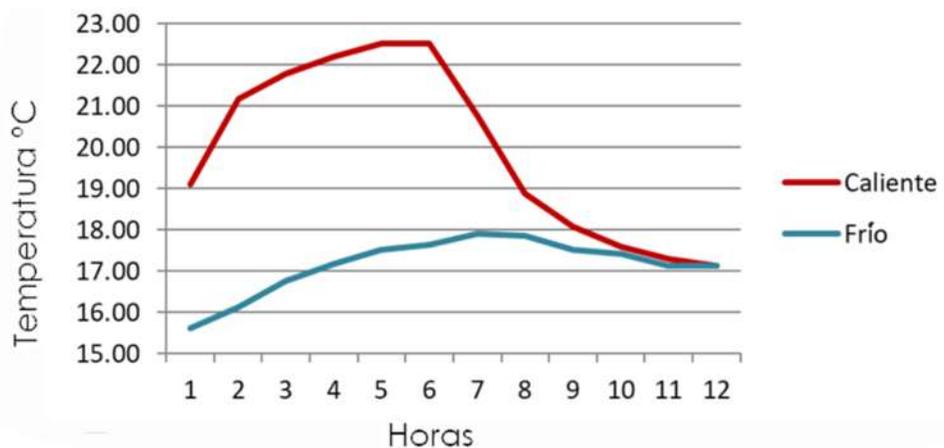
Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.11	15.62	22.61	24.26	16.00	15.97	3.49
2	21.17	16.13	24.09	25.96	16.24	16.12	5.05
3	21.77	16.76	23.93	25.70	16.60	16.35	5.01
4	22.19	17.17	23.98	25.70	16.84	16.46	5.02
5	22.51	17.52	24.07	25.79	17.01	16.58	4.99
6	22.51	17.65	23.91	25.60	17.20	16.77	4.86

<b>PROM</b>	21.54	16.81	23.76	25.50	16.65	16.38	4.74
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------



**Gráfico. 41** Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-CC III durante las seis horas

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 42.** Diferencia de temperaturas CC-CC III

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 84. Amortiguamiento térmico CC-CC III**

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.38	18.28	
Temperatura mínima	19.62	16.76	
Diferencia	2.76	1.52	0.55

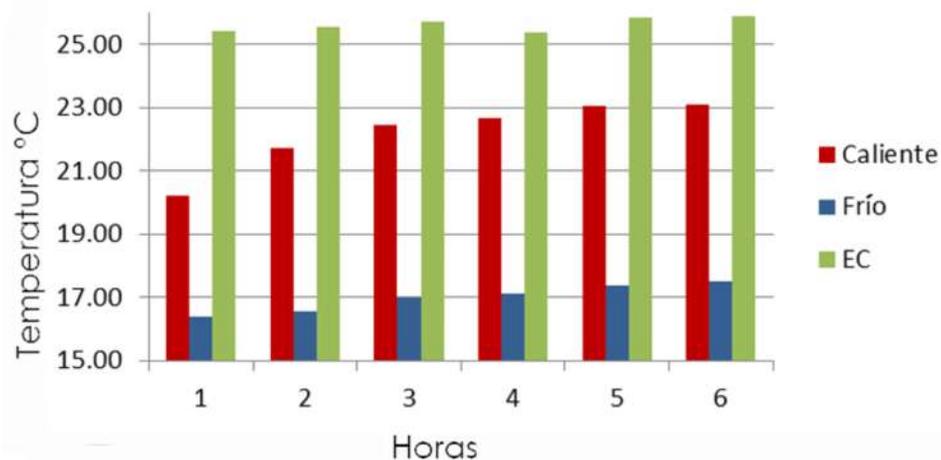
## Cal de construcción- PET – carbonato de calcio (CC-P-CC)

### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

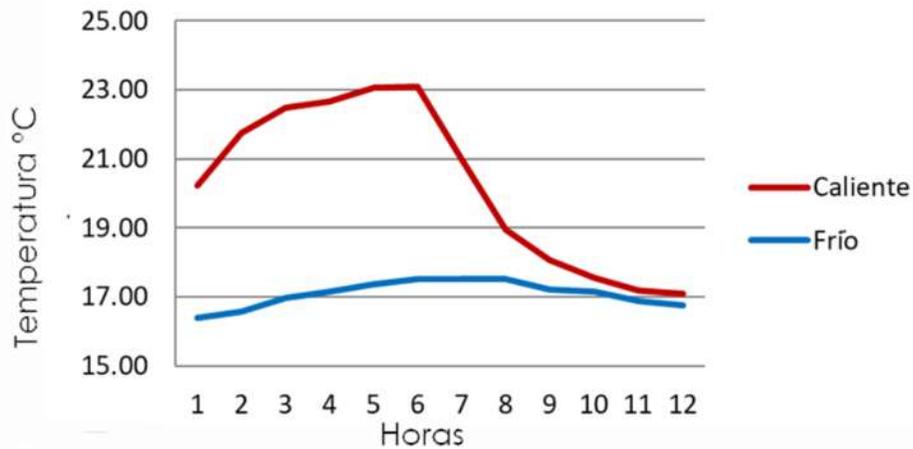
**Tabla 85. Resultados CC-P-CC I promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	20.22	16.38	23.71	25.42	16.87	16.85	3.84
2	21.74	16.57	23.68	25.55	16.91	16.85	5.17
3	22.48	16.98	23.92	25.71	17.04	16.94	5.50
4	22.67	17.14	23.63	25.39	17.15	17.01	5.53
5	23.05	17.36	24.08	25.86	17.23	17.07	5.69
6	23.08	17.52	24.13	25.89	17.33	17.16	5.56
PROM	22.21	16.99	23.86	25.64	17.09	16.98	5.21



**Gráfico. 43. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-P-CC I durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 44. Diferencia de temperaturas CC-P-CC I.**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 86. Amortiguamiento térmico CC-P-CC I.**

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	23.08	17.52	
Temperatura mínima	20.22	16.38	
Diferencia	2.86	1.14	0.40

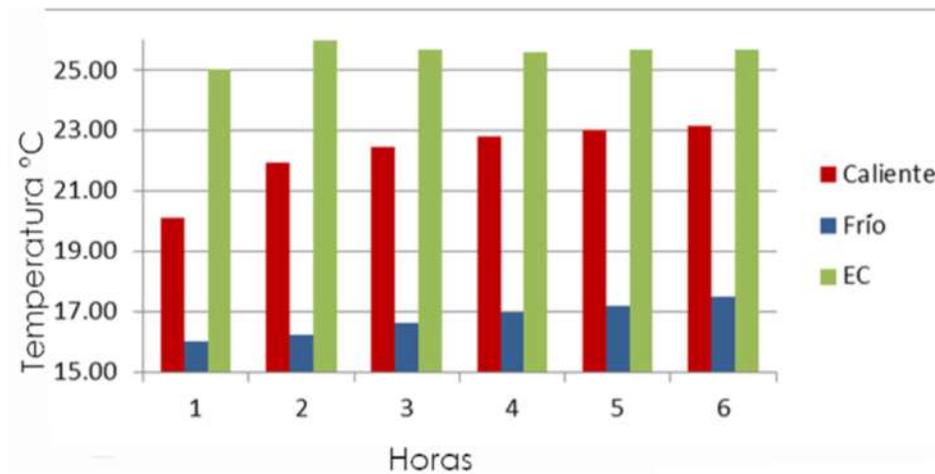
## Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 87. Resultados CC-P-CC II promedios por seis horas con fuente de calor.**

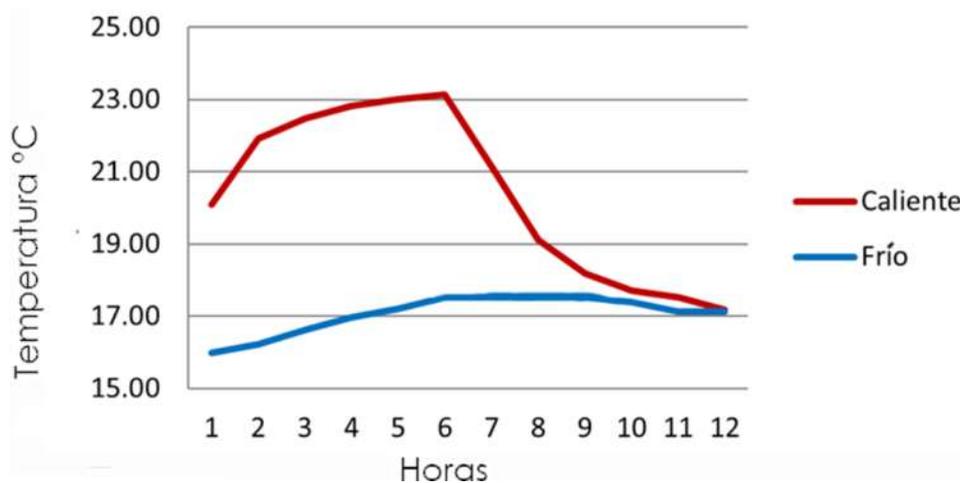
Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	20.09	16.00	23.25	25.04	16.30	16.27	4.09
2	21.93	16.22	24.07	25.97	16.45	16.41	5.71
3	22.48	16.63	23.89	25.67	16.69	16.60	5.84
4	22.83	16.98	23.86	25.59	16.91	16.77	5.85
5	23.02	17.20	23.97	25.68	17.10	16.95	5.82
6	23.15	17.52	24.00	25.70	17.26	17.08	5.63

PROM	22.25	16.76	23.84	25.61	16.78	16.68	5.49
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------



**Gráfico. 45.** Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-P-CC II durante las seis horas.

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 46.** Diferencia de temperaturas CC-P-CC II

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 88. Amortiguamiento térmico CC-P-CC II.**

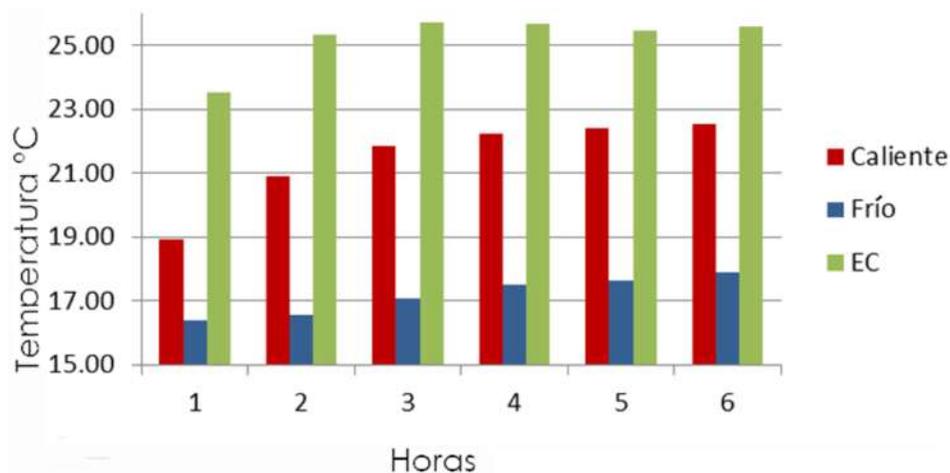
	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	23.15	17.52	
Temperatura mínima	17.52	16	
Diferencia	5.63	1.52	0.27

### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

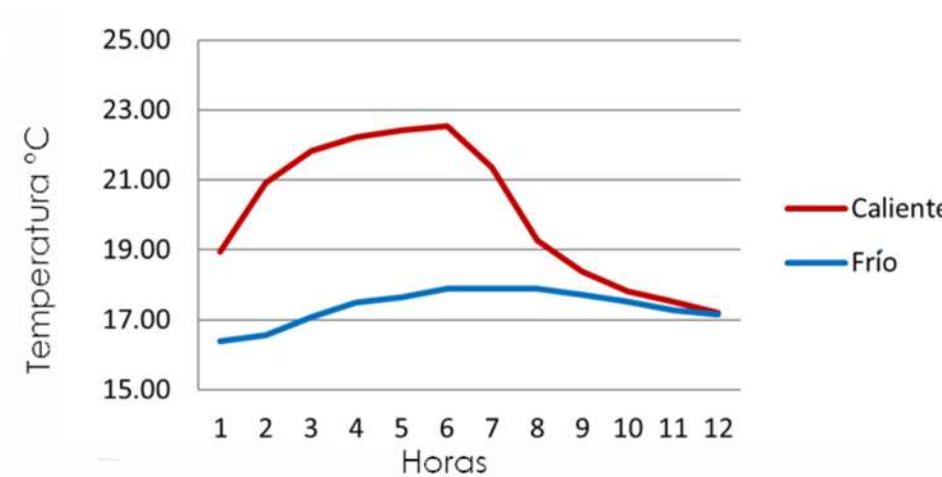
**Tabla 89. Resultados CC-P-CC III promedios por seis horas con fuente de calor.**

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	18.95	16.38	22.15	23.55	16.66	16.61	2.57
2	20.92	16.57	23.55	25.33	16.78	16.68	4.35
3	21.84	17.08	24.03	25.72	17.05	16.82	4.76
4	22.22	17.49	24.05	25.67	17.28	16.96	4.73
5	22.41	17.65	23.88	25.48	17.47	17.10	4.77
6	22.54	17.90	24.03	25.60	17.63	17.23	4.64
<b>PROM</b>	21.48	17.18	23.62	25.23	17.14	16.90	4.30



**Gráfico. 47. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CC-P-CC III durante las seis horas.**

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 48. Diferencia de temperaturas CC-P-CC III**

0En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 90. Amortiguamiento térmico CC-P-CC III.**

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.54	17.9	
Temperatura mínima	18.95	16.38	
Diferencia	3.59	1.52	0.42

## Cemento de albañilería – arena volcánica (CA)

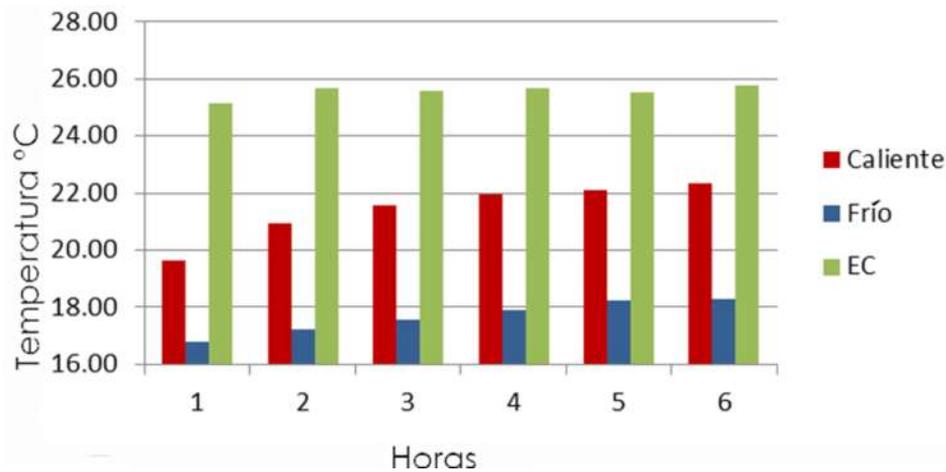
### Espécimen I

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 91. Resultados CA I promedios por seis horas con fuente de calor.**

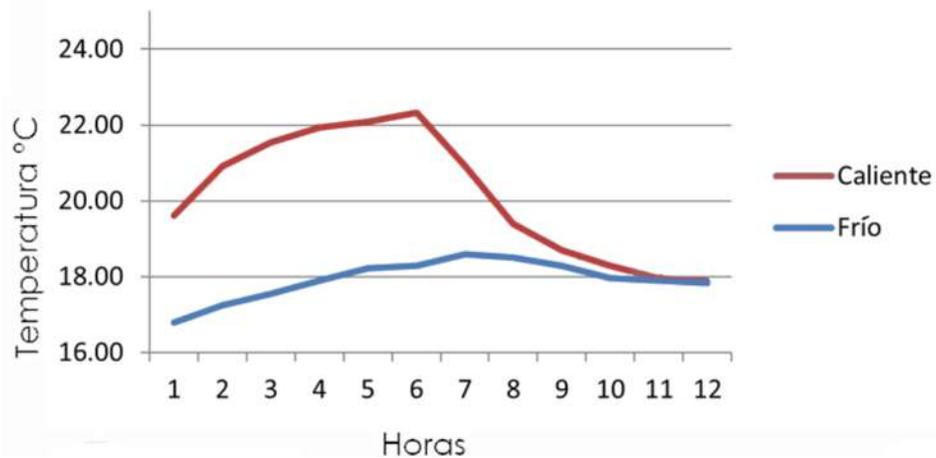
Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.62	16.79	23.54	25.15	17.04	16.86	2.83
2	20.92	17.24	24.08	25.68	17.26	16.99	3.68
3	21.55	17.55	24.03	25.56	17.53	17.11	4.00
4	21.93	17.90	24.18	25.67	17.74	17.21	4.03
5	22.09	18.22	24.06	25.55	17.91	17.34	3.88

<b>6</b>	22.32	18.28	24.30	25.79	18.08	17.51	4.04
<b>PROM</b>	21.40	17.66	24.03	25.57	17.59	17.17	3.74



**Gráfico. 49.**Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CA I durante las seis horas.

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 50.** Diferencia de temperaturas CA I

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

Tabla 92. Amortiguamiento térmico CA I.

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.32	18.28	
Temperatura mínima	19.62	16.79	
Diferencia	2.7	1.49	0.55

### Espécimen II

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 93. Resultados CA II promedios por seis horas con fuente de calor.

Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.33	16.89	22.66	24.24	17.18	17.12	2.44
2	21.05	17.27	24.05	25.77	17.25	17.15	3.78
3	21.65	17.65	24.07	25.70	17.44	17.28	4.00
4	21.93	18.00	24.03	25.63	17.67	17.48	3.94
5	22.25	18.28	24.17	25.77	17.82	17.59	3.97
6	22.32	18.44	24.05	25.58	17.93	17.68	3.88
PROM	21.42	17.75	23.84	25.45	17.55	17.38	3.67

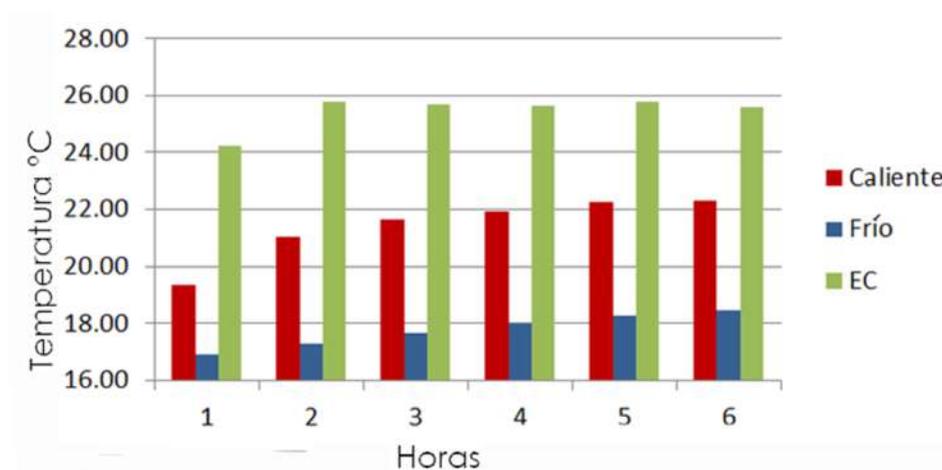
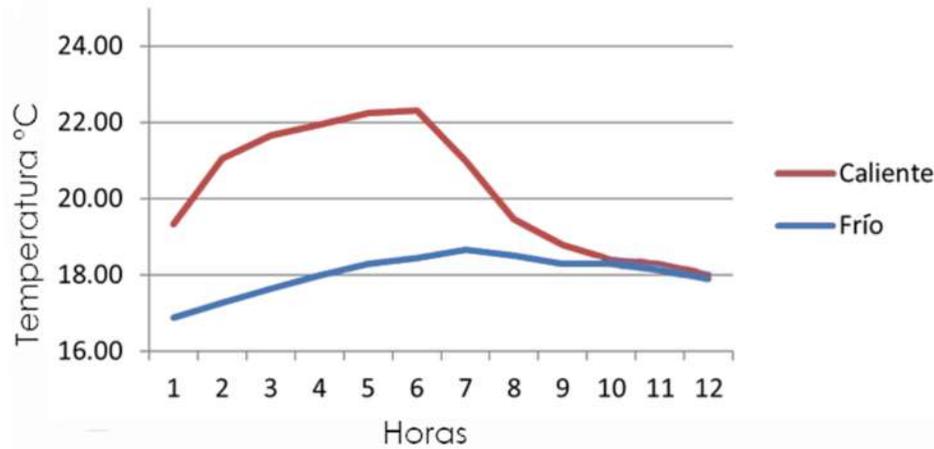


Gráfico. 51. Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CA II durante las seis horas.

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 52. Diferencia de temperaturas CA II**

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 94. Amortiguamiento térmico CA II.**

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.32	18.44	
Temperatura mínima	19.33	16.89	
Diferencia	2.99	1.55	0.52

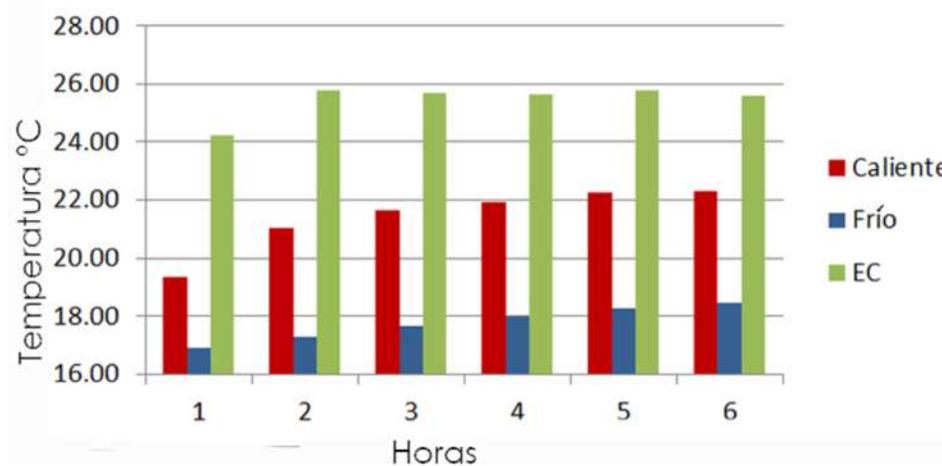
### Espécimen III

Los resultados se promediaron por hora durante las seis horas de calor y los datos obtenidos fueron los siguientes:

**Tabla 95. Resultados CA II promedios por seis horas con fuente de calor.**

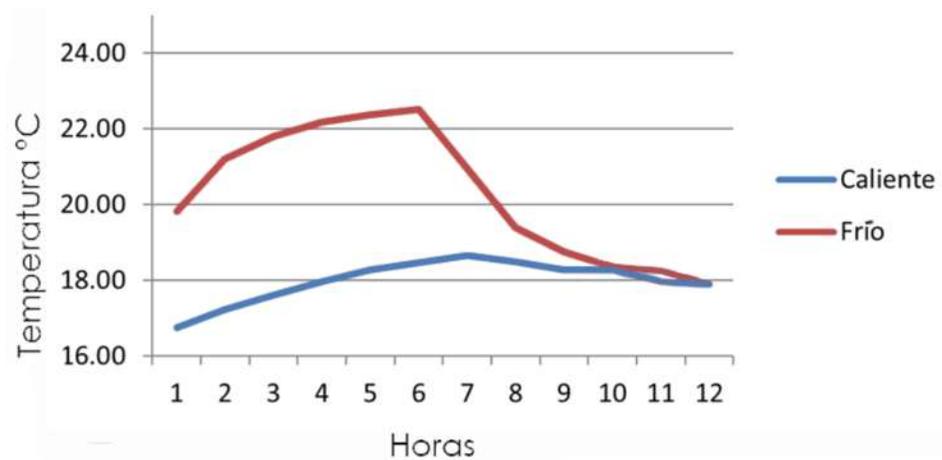
Hora	Caliente	Frío	Área C	EC	Área F	EF	Diferencia
1	19.84	16.76	24.01	25.17	17.03	16.91	3.08
2	21.20	17.24	24.27	25.63	17.22	16.96	3.97
3	21.81	17.62	24.29	25.65	17.50	17.08	4.19
4	22.19	17.96	24.35	25.68	17.78	17.28	4.23
5	22.38	18.28	24.41	25.69	18.01	17.46	4.10
6	22.51	18.47	24.31	25.61	18.18	17.60	4.04

<b>PROM</b>	21.65	17.72	24.27	25.57	17.62	17.22	3.93
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------



**Gráfico. 53** Diferencia de temperatura de las caras y la zona caliente CA III durante las seis horas.

La gráfica muestra la diferencia de temperatura entre las dos caras del espécimen durante las seis horas de calor y posteriormente seis horas de enfriamiento.



**Gráfico. 54.** Diferencia de temperaturas CAP III

En base a la información adquirida se puede obtener el amortiguamiento térmico:

**Tabla 96. Amortiguamiento térmico CA III.**

	Área caliente	Área fría	A=a/b
Temperatura máxima	22.51	18.47	
Temperatura mínima	19.84	16.76	
Diferencia	2.67	1.71	0.64

## Discusión de resultados

La prueba de caja caliente proporcionó datos sobre el tiempo que tardan los morteros en equilibrar la temperatura entre las dos caras y el amortiguamiento térmico. Estos resultados son esenciales para comprender el comportamiento térmico de los morteros. Con esta información, podemos analizar cómo los diferentes morteros responden al calor y cómo pueden afectar la eficiencia energética y el aislamiento térmico de las estructuras en las que se utilizan. Estos hallazgos son valiosos para la selección adecuada de materiales y el diseño óptimo de construcciones que requieran un control térmico eficiente.

**Tabla 97. Tiempo de equilibrio entre las dos caras de los morteros.**

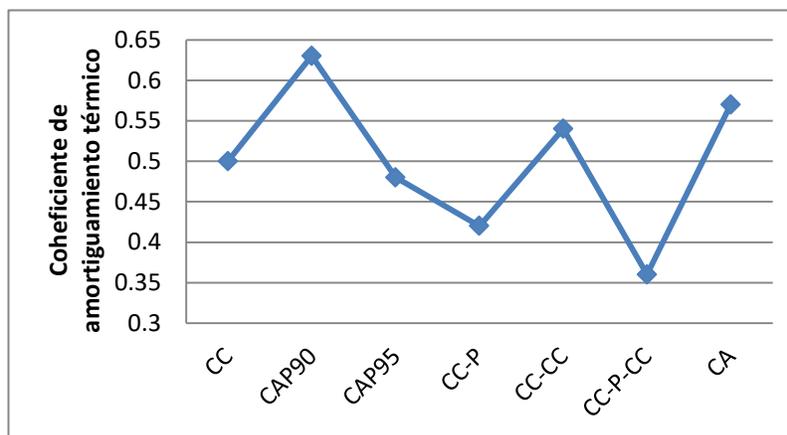
Mortero	Tiempo
CC	05:50
CAP90	06:05
CAP95	03:52
CC-P	03:32
CC-CC	04:52
CC-P- CC	04:55
CA	04:50

El amortiguamiento térmico proporciona información crucial sobre cómo los materiales reaccionan a variaciones térmicas y cambios de temperatura. Un alto coeficiente de amortiguamiento indica que el material puede absorber y disipar el calor eficientemente. Por el contrario, cuando el valor del coeficiente de amortiguamiento térmico es cercano a cero, significa que el material tiene una baja capacidad de amortiguamiento y, por lo tanto, tarda más tiempo en alcanzar el equilibrio térmico. Un coeficiente cercano a uno indica un alto amortiguamiento térmico, lo que significa que el material puede disipar rápidamente la energía térmica y alcanzar el equilibrio térmico de manera más

eficaz. Esta propiedad es fundamental para entender cómo los materiales pueden regular la temperatura en diversas aplicaciones, incluyendo el diseño de materiales de aislamiento y en la construcción de edificios con un enfoque en la eficiencia energética. Los resultados obtenidos de las pruebas en la caja caliente fueron los siguientes:

**Tabla 98. Promedio de amortiguamiento térmico de los morteros.**

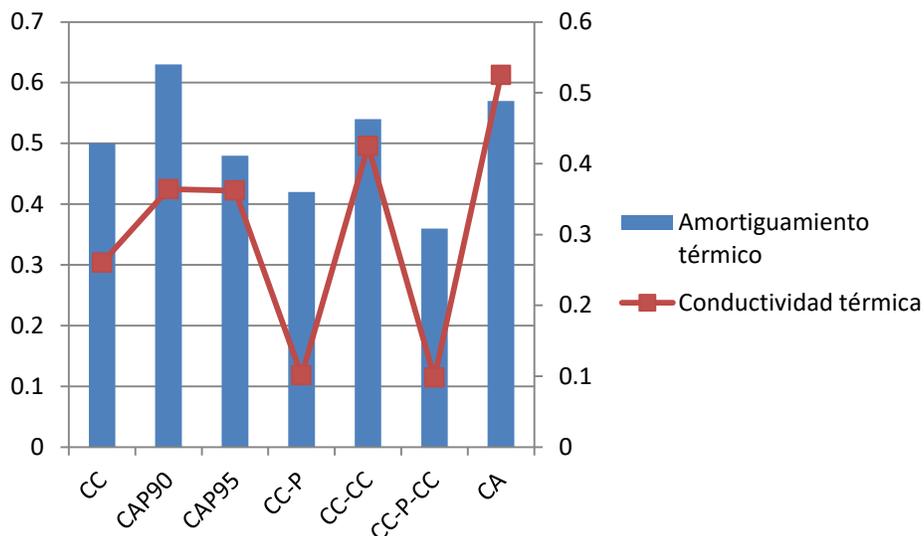
Mortero	E	AT	promedio
CC	I	0.50	0.50
	II	0.58	
	III	0.42	
CAP90	I	0.56	0.63
	II	0.59	
	III	0.75	
CAP95	I	0.48	0.48
	II	0.56	
	III	0.41	
CC-P	I	0.26	0.42
	II	0.49	
	III	0.5	
CC-CC	I	0.52	0.54
	II	0.55	
	III	0.55	
CC-P-CC	I	0.4	0.36
	II	0.27	
	III	0.42	
CA	I	0.55	0.57
	II	0.52	
	III	0.64	



**Gráfico. 55. Promedio de amortiguamiento térmico de los morteros.**

**Tabla 99. Conductividad térmica, amortiguamiento térmico y tiempo que tarda en equilibrarse la temperatura en entre dos caras.**

Mortero	Tiempo de equilibrio	Amortiguamiento térmico	Conductividad térmica	
CC	05:50	0.50	0.260	(W/m·K)
CAP90	06:05	0.63	0.364	(W/m·K)
CAP95	03:52	0.48	0.362	(W/m·K)
CC-P	03:32	0.42	0.101	(W/m·K)
CC-CC	04:52	0.54	0.425	(W/m·K)
CC-P-CC	04:55	0.36	0.098	(W/m·K)
CA	04:50	0.57	0.525	(W/m·K)



**Gráfico. 56. Relación entre el amortiguamiento térmico y la conductividad térmica.**

La relación entre el amortiguamiento térmico y la conductividad térmica no siempre es lineal o directa, ya que existen otras variables que pueden influir. Sin embargo, podemos afirmar que cuando un material tiene baja conductividad térmica, se considera un buen aislante, lo que se traduce en un coeficiente de amortiguamiento térmico más alto. Esto significa que puede retener más energía térmica, como sucede con el adobe, que es excelente para evitar que el calor traspase los muros durante el día, pero permite liberar el calor almacenado durante la noche. Por otro lado, cuando un material es un excelente conductor térmico, su capacidad para absorber y retener energía térmica durante cambios

de temperatura es limitada, como sucede con el acero que se calienta rápidamente pero también se enfría rápidamente.

## Conclusiones

Los morteros que contienen PET como agregado muestran un bajo amortiguamiento térmico, lo que indica que no retienen el calor tan eficientemente en comparación con los otros morteros. Sin embargo, también tienen una baja conductividad térmica, lo que los convierte en buenos aislantes térmicos. Podemos concluir que el PET proporciona estas características de ser un buen aislante y, al mismo tiempo, no retener tan bien el calor.

Entre las calces de alta pureza, ambas tienen valores similares de conductividad térmica, pero el mortero CAP90 presenta un mayor amortiguamiento térmico, lo que sugiere que puede retener mejor la energía térmica.

En cuanto a los morteros CC, CC-CC y CA, observamos que el amortiguamiento térmico es muy similar, pero el coeficiente de conductividad térmica de CC es bajo, mientras que el de CA es más alto. Esto indica que la cal de construcción es una buena opción en términos de estas propiedades.



## Análisis climático y bioclimático de la ciudad de Morelia, Michoacán.

El análisis climático de la ciudad de Morelia, Michoacán, desempeña un papel fundamental en el estudio del tiempo de exposición utilizado en las pruebas realizadas en la caja caliente. La comprensión detallada de los patrones climáticos locales, incluyendo temperatura, humedad, radiación solar y vientos, proporciona información crucial para establecer los parámetros de exposición en el análisis de materiales y componentes de construcción en entornos reales.

Este anexo presenta un estudio exhaustivo del clima local de Morelia, destacando los factores climáticos relevantes que influyen en el tiempo de exposición de los materiales en la caja caliente. A través del análisis de datos climáticos históricos y la identificación de patrones estacionales y diurnos, se busca establecer un marco de referencia climático que sirva como base para las pruebas de materiales y la evaluación de su desempeño térmico.

El objetivo principal de este análisis climático es proporcionar una comprensión profunda de las condiciones climáticas locales de Morelia y su impacto en el tiempo de exposición en la caja caliente. Al hacerlo, se busca mejorar la precisión y relevancia de las pruebas de materiales realizadas en condiciones simuladas, permitiendo una evaluación más precisa de su comportamiento térmico y su idoneidad para aplicaciones específicas en la construcción.

### Datos generales de la ciudad

La ciudad de Morelia se ubica en las coordenadas geográficas Latitud: **19.7006**, Longitud: **-101.186** 19° 42' 2" Norte, 101° 11' 10" Oeste, tiene una superficie de 119.902 hectáreas, altitud 1.911 m, su clima se considera como cálido templado, lluvias en verano.

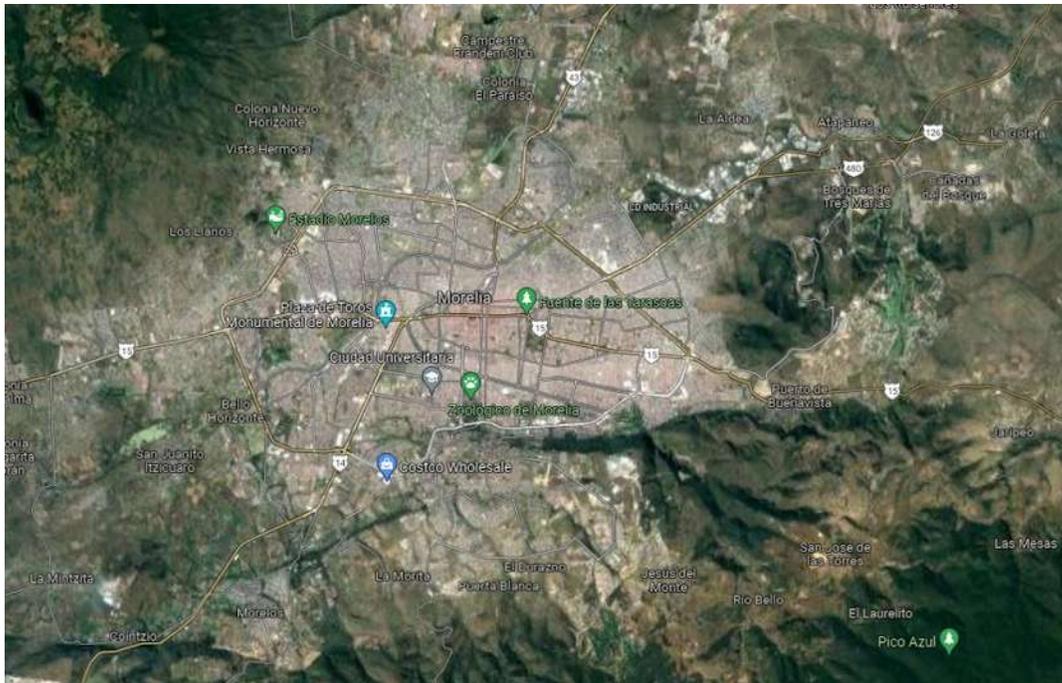


Figura 86. Morelia, Michoacán México. Google maps.

### Análisis de la información climática

Las temperaturas se obtuvieron en la base del servicio meteorológico Nacional (Servicio Meteorológico Nacional), obtenidas del periodo de registro de 1981-2010 como o promedio, obteniendo las siguientes tablas y gráficas.

### Temperatura

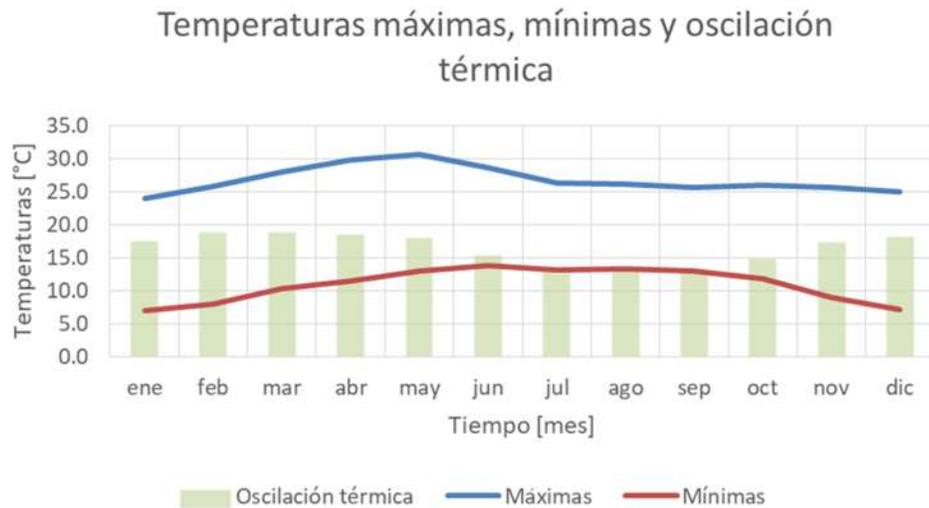
Tabla 100. Marcha horaria de temperatura por mes y anual.

Localidad	ESTIMACIÓN DE TEMPERATURAS HORARIAS MEDIAS MENSUALES A PARTIR DE MEDIAS EXTREMAS											
	Morelia	Lat. (xx.x)	19	Long.(xxx.x)	101	Altitud (m)	190	190	190	190	190	190
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Temp max	24.1	26.0	28.0	29.9	30.7	28.7	26.3	26.1	25.7	26.0	25.8	25.0
Temp min	6.6	7.3	9.2	11.4	12.7	13.4	12.8	13.2	12.9	11.2	8.6	6.9
Temp med	15.4	16.7	18.6	20.7	21.7	21.1	19.6	19.7	19.3	18.6	17.2	16.0
Hora min	6.5	6.3	6.1	5.8	5.6	5.4	5.5	5.7	5.9	6.2	6.5	6.6
Hora max	13.9	13.8	12.9	13.5	13.1	13.3	12.7	13.2	13.5	13.4	14.0	13.8
Hora (TSV)												
00:00	11.2	12.0	13.7	15.6	16.6	16.6	15.7	16.0	15.9	14.8	13.0	11.7
01:00	10.3	11.1	12.9	14.8	15.8	16.0	15.1	15.5	15.3	14.2	12.2	10.8
02:00	9.6	10.4	12.1	14.1	15.2	15.5	14.7	15.1	14.9	13.6	11.5	10.1
03:00	9.0	9.8	11.6	13.6	14.7	15.1	14.3	14.7	14.5	13.1	11.0	9.4
04:00	8.5	9.3	11.1	13.1	14.3	14.7	14.0	14.4	14.1	12.7	10.5	8.9
05:00	8.1	8.9	10.7	12.8	14.0	14.4	13.7	14.1	13.9	12.4	10.1	8.5

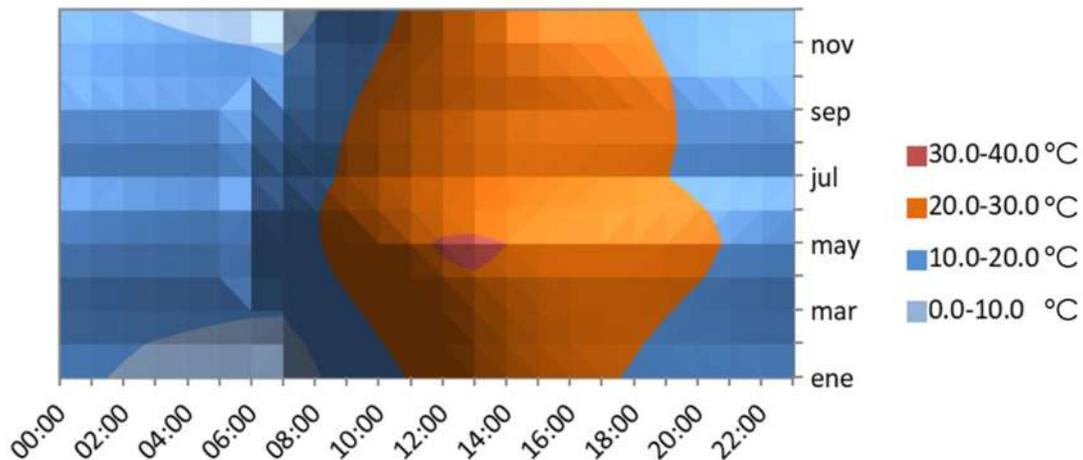
**Desarrollo y evaluación de morteros de cal, integrando arena volcánica y PET reciclado para construcciones eficientes y sustentables**

<b>06:00</b>	7.8	8.5	10.4	11.4	12.9	13.7	13.0	13.3	12.9	12.2	9.8	8.2
<b>07:00</b>	6.8	7.9	10.3	13.3	15.3	16.0	14.9	14.8	13.9	11.8	8.9	7.1
<b>08:00</b>	9.2	10.9	13.8	17.2	19.3	19.4	18.0	17.5	16.4	14.3	11.4	9.4
<b>09:00</b>	13.2	15.2	18.3	21.5	23.5	22.9	21.1	20.6	19.4	17.8	15.3	13.5
<b>10:00</b>	17.2	19.4	22.3	25.3	26.9	25.8	23.6	23.1	22.1	21.1	19.2	17.7
<b>11:00</b>	20.5	22.8	25.4	28.0	29.2	27.6	25.3	24.9	24.1	23.6	22.4	21.1
<b>12:00</b>	22.7	24.9	27.2	29.4	30.4	28.5	26.1	25.8	25.3	25.2	24.6	23.5
<b>13:00</b>	23.9	25.8	27.9	29.8	30.6	28.6	26.2	26.1	25.7	25.9	25.6	24.7
<b>14:00</b>	24.0	25.8	27.7	29.4	30.0	28.0	25.7	25.7	25.4	25.8	25.7	24.9
<b>15:00</b>	23.4	25.0	26.8	28.3	28.9	27.0	24.9	24.9	24.8	25.2	25.1	24.3
<b>16:00</b>	22.3	23.8	25.4	26.9	27.4	25.7	23.7	23.9	23.8	24.1	23.9	23.2
<b>17:00</b>	20.8	22.2	23.7	25.2	25.8	24.3	22.5	22.7	22.7	22.9	22.5	21.7
<b>18:00</b>	19.2	20.5	22.0	23.5	24.1	22.9	21.3	21.5	21.5	21.5	20.9	20.1
<b>19:00</b>	17.6	18.7	20.3	21.8	22.5	21.6	20.1	20.4	20.3	20.1	19.4	18.4
<b>20:00</b>	16.1	17.1	18.7	20.3	21.0	20.3	19.0	19.3	19.2	18.8	17.8	16.8
<b>21:00</b>	14.6	15.6	17.2	18.9	19.7	19.2	18.0	18.3	18.2	17.7	16.4	15.3
<b>22:00</b>	13.3	14.2	15.8	17.6	18.5	18.2	17.1	17.4	17.3	16.6	15.1	13.9
<b>23:00</b>	12.2	13.0	14.7	16.5	17.4	17.3	16.3	16.7	16.6	15.7	14.0	12.7
<b>Máximas</b>	24.0	25.8	27.9	29.8	30.6	28.6	26.2	26.1	25.7	25.9	25.7	24.9
<b>Mínimas</b>	6.8	7.9	10.3	11.4	12.9	13.7	13.0	13.3	12.9	12.2	9.8	8.2
<b>Oscilación térmica</b>	17.5	18.7	18.8	18.5	18.0	15.3	13.5	12.9	12.8	14.8	17.2	18.1

<b>Promedio</b>	15.1	16.4	18.3	20.3	21.4	20.8	19.3	19.4	19.1	18.4	16.9	15.7
<b>TN mensual</b>	<b>22.5</b>	<b>22.9</b>	<b>23.5</b>	<b>24.1</b>	<b>24.4</b>	<b>24.3</b>	<b>23.8</b>	<b>23.8</b>	<b>23.7</b>	<b>23.5</b>	<b>23.0</b>	<b>22.7</b>
TN máxima	25.0	25.4	26.0	26.6	26.9	26.8	26.3	26.3	26.2	26.0	25.5	25.2
TN mínima	20.0	20.4	21.0	21.6	21.9	21.8	21.3	21.3	21.2	21.0	20.5	20.2



**Gráfico. 57.**Temperaturas y oscilación térmica.



**Gráfico. 58.**Isoterma.

## Humedad

La humedad es la cantidad de agua que contiene el aire, en el caso de Manzanillo al encontrarse en zona costera su humedad es alta.

Tabla 101. Humedad relativa en el año.

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Temp max	24.1	26.0	28.0	29.9	30.7	28.7	26.3	26.1	25.7	26.0	25.8	25.0
Temp med	15.4	16.7	18.6	20.7	21.7	21.1	19.6	19.7	19.3	18.6	17.2	16.0
Temp min	6.6	7.3	9.2	11.4	12.7	13.4	12.8	13.2	12.9	11.2	8.6	6.9
H R med observ												
H R max observ												
H R min observ												
H R med calc	55	52	52	54	55	61	64	66	65	60	55	54
H R max calc	78	76	75	76	78	83	86	87	87	82	77	77
H R min calc	32	29	29	31	32	38	42	44	44	38	32	30
Hora max	6.514	6.312	6.066	5.783	5.552	5.431	5.479	5.676	5.948	6.221	6.457	6.569
Hora min	13.924	13.812	12.896	13.453	13.142	13.341	12.729	13.176	13.538	13.391	13.957	13.819
Hora (TSV)												
00:00	66	64	64	66	69	74	76	77	77	71	66	65
01:00	68	66	66	68	70	76	78	79	79	73	68	67
02:00	70	68	68	70	72	77	80	81	80	75	70	69
03:00	72	69	69	71	73	79	81	82	81	76	71	70
04:00	73	71	70	72	74	80	82	83	83	78	73	72
05:00	74	72	71	73	75	80	83	84	83	78	74	73
06:00	75	72	72	76	78	83	85	87	87	79	74	74
07:00	77	74	72	72	72	76	79	82	83	80	77	76
08:00	71	67	64	62	62	66	69	72	75	73	70	70
09:00	61	56	53	51	51	55	59	62	65	63	60	60
10:00	50	46	43	42	42	47	51	54	56	53	49	49
11:00	41	37	36	36	36	42	45	48	49	45	41	40
12:00	35	32	31	32	33	39	43	45	46	40	35	34
13:00	32	30	30	31	33	39	43	44	44	38	33	31
14:00	32	30	30	32	34	40	44	45	45	39	32	31
15:00	33	32	32	35	37	43	47	48	47	41	34	32
16:00	36	35	36	38	41	47	50	51	50	44	37	35
17:00	40	39	40	42	45	51	54	55	54	47	41	39
18:00	44	43	44	47	49	55	58	59	58	51	45	43
19:00	49	47	48	51	53	59	62	63	62	56	49	47
20:00	53	51	52	55	57	63	66	67	66	59	53	51
21:00	57	55	56	58	61	66	69	70	69	63	57	55
22:00	60	58	59	61	64	69	72	73	72	66	60	59
23:00	63	61	62	64	66	72	74	75	75	69	63	62
Promedio	56	53	53	54	56	62	65	66	66	61	56	54

Desarrollo y evaluación de morteros de cal, integrando arena volcánica y PET reciclado para construcciones eficientes y sustentables

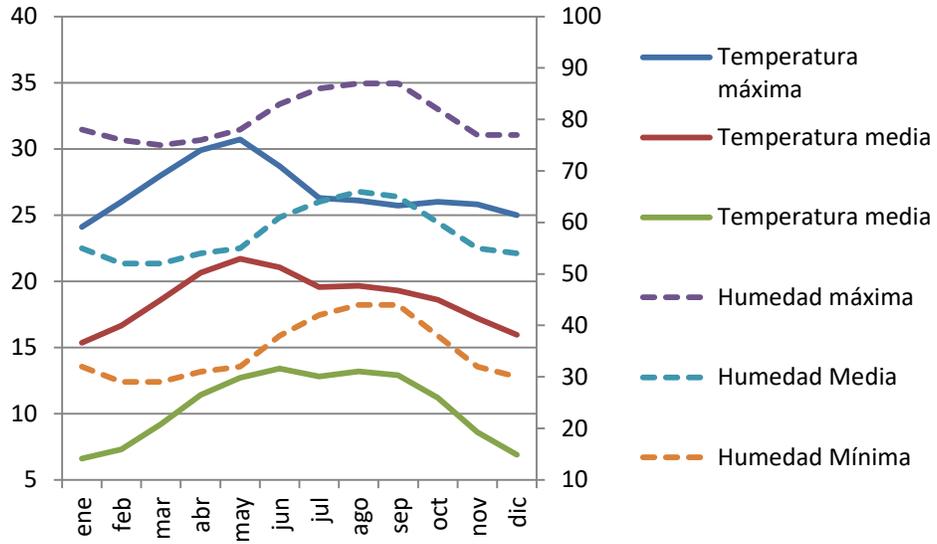


Gráfico. 59. Temperatura (grados centígrados) humedad anual (porcentaje)

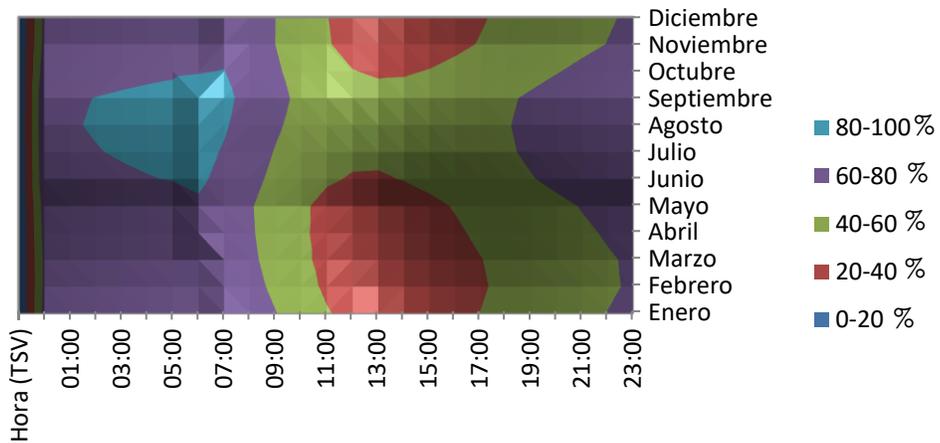


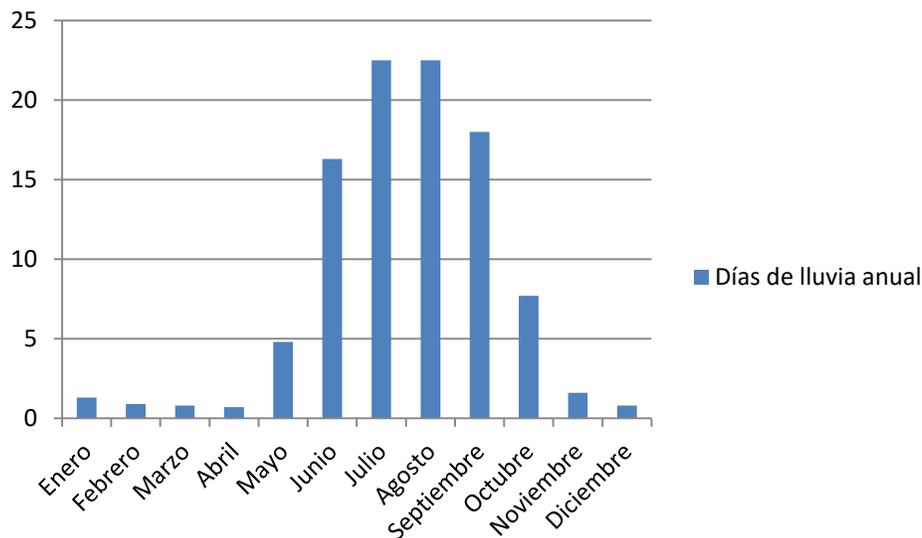
Gráfico. 60. Isohigras.

## Precipitaciones

La temporada de lluvia y huracanes comienza en los meses de junio a octubre, siendo agosto y septiembre los de mayor precipitación (Semarnat)

**Tabla 102. Días de lluvia anual.**

Ene	Feb	Mar	Ab r	May	Jun	Juli	Ago	Sep	OcT	Nov	Dic
1.3	0.9	0.8	0.7	4.8	16. 3	22. 5	22.5	18	7.7	1.6	0.8



**Gráfico. 61. Número de días de lluvia anual**

## Promedio mensual de lluvia

Se considera que la temporada de lluvia comienza del 21 de mayo al 13 de febrero (Weather Spark), siendo los meses de julio y agosto los que presentan mayor cantidad de lluvia (tabla 3 y gráfico 6)

**Tabla 103. Promedio mensual de lluvia.**

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
mm	13.7	9.2	5.4	2.5	21.2	104	148	145	118	43.1	9.6	3.2

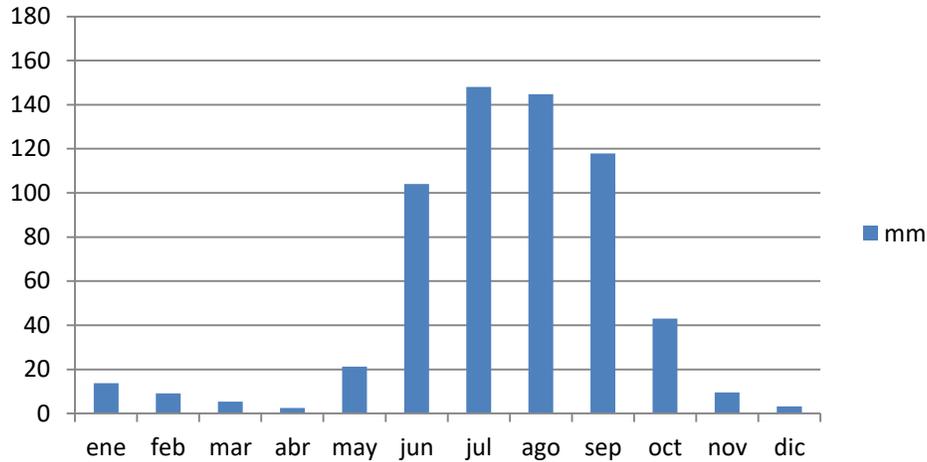


Gráfico. 62. Promedio mensual de lluvia.

## Viento

El viento depende de la topografía en su mayoría, la velocidad y dirección del viento pueden variar, para la ciudad de Morelia se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 104. Velocidad del viento.

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
kph	7.7	8.2	9	8.8	7.8	6.9	6.3	6.4	7.3	7.4	7.3	7.2

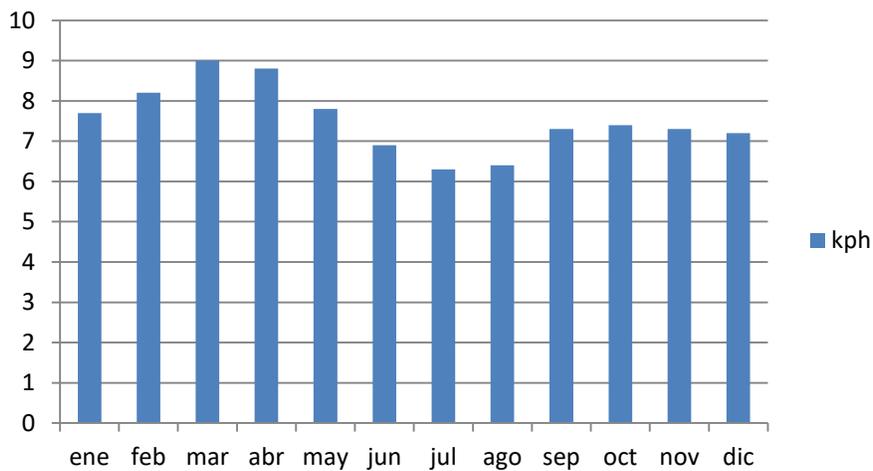


Gráfico. 63. Velocidad del viento (Km/h) Semarnat

Tabla 105. Porcentaje de viento dominante.

Vientos dominantes	
Este	37.00%
Norte	32.00%
Sureste	31%

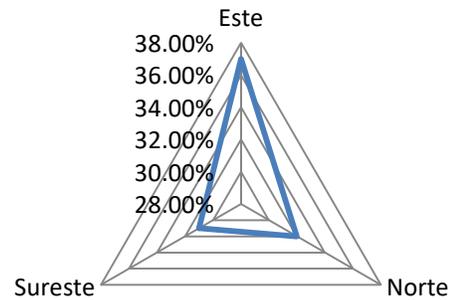


Gráfico. 64. Vientos dominantes.

## Análisis bioclimático

### Carta Psicométrica

Es una herramienta en la cual se puede obtener la zona de confort (eadic) y se identifica los requerimientos para las horas y meses del año, para aplicar estrategias de climatización

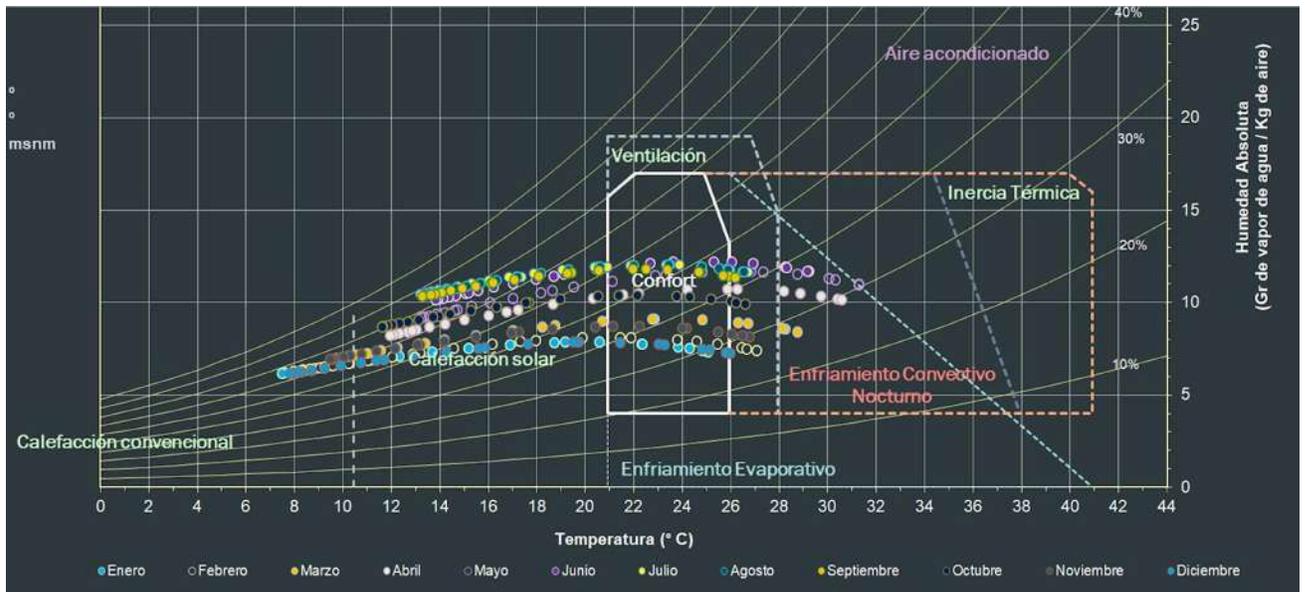


Gráfico. 65. Carta psicrométrica.

### Zona de confort

El clima de la ciudad tiene mayor días de confort térmico los meses de Septiembre y Diciembre, siguiendo julio y agosto, mientras que las madrugadas son frías (tabla 6)

Tabla 106. Horas de calor, confort y frío.

	Calor	confort	frío	frío (< 10.25 C)
enero		5	9	10
febrero	3	5	9	7
marzo	3	3	15	3
abril	6	4	14	0
mayo	6	4	14	0
junio	6	4	14	0
julio	2	6	16	0
agosto	2	6	16	0
septiembre	1	7	16	0
octubre	3	5	16	0
noviembre	3	5	16	0
diciembre	0	7	11	6
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>61</b>	<b>166</b>	<b>26</b>

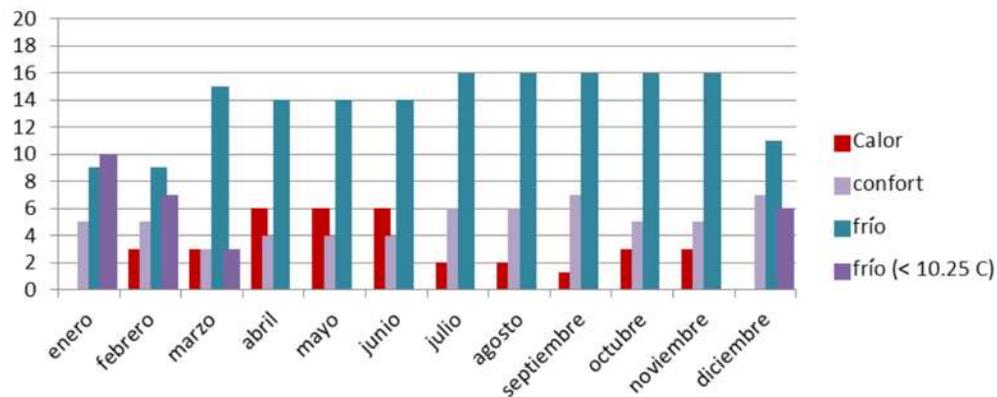


Gráfico. 66.Días de calor, confort y frío.

## Requerimientos de climatización

En base a la información anterior, se obtuvieron los requerimientos necesarios para la ciudad de Morelia (tabla 7).

Tabla 107.Requerimientos de climatización (horas)

	enfriar	mantener	calentar pasivo	Calefacción
enero	0	5	9	10
febrero	3	5	9	7
marzo	3	3	15	3
abril	6	4	14	0
mayo	6	4	14	0
junio	6	4	14	0
julio	2	6	16	0
agosto	2	6	16	0
septiembre	1	7	16	0
octubre	3	5	16	0
noviembre	3	5	16	0
diciembre	0	7	11	6

Desarrollo y evaluación de morteros de cal, integrando arena volcánica y PET reciclado para construcciones eficientes y sustentables

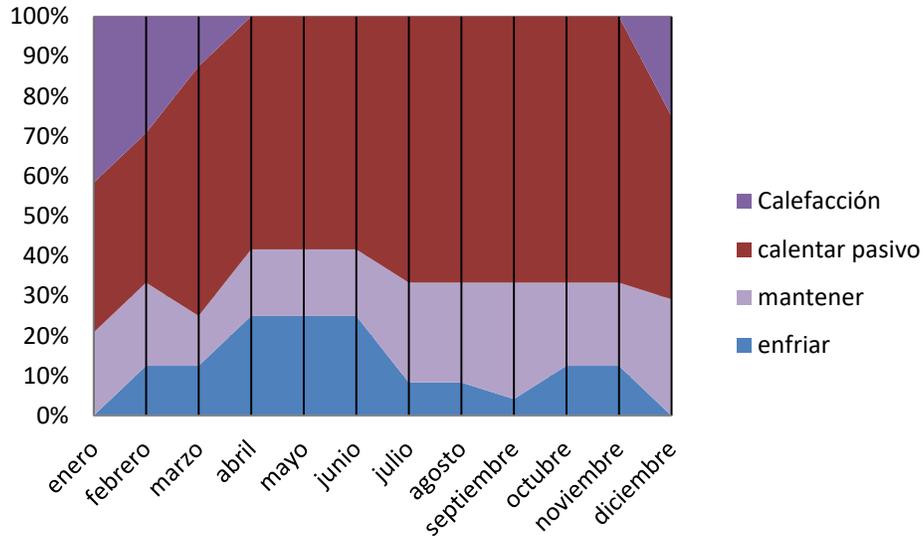
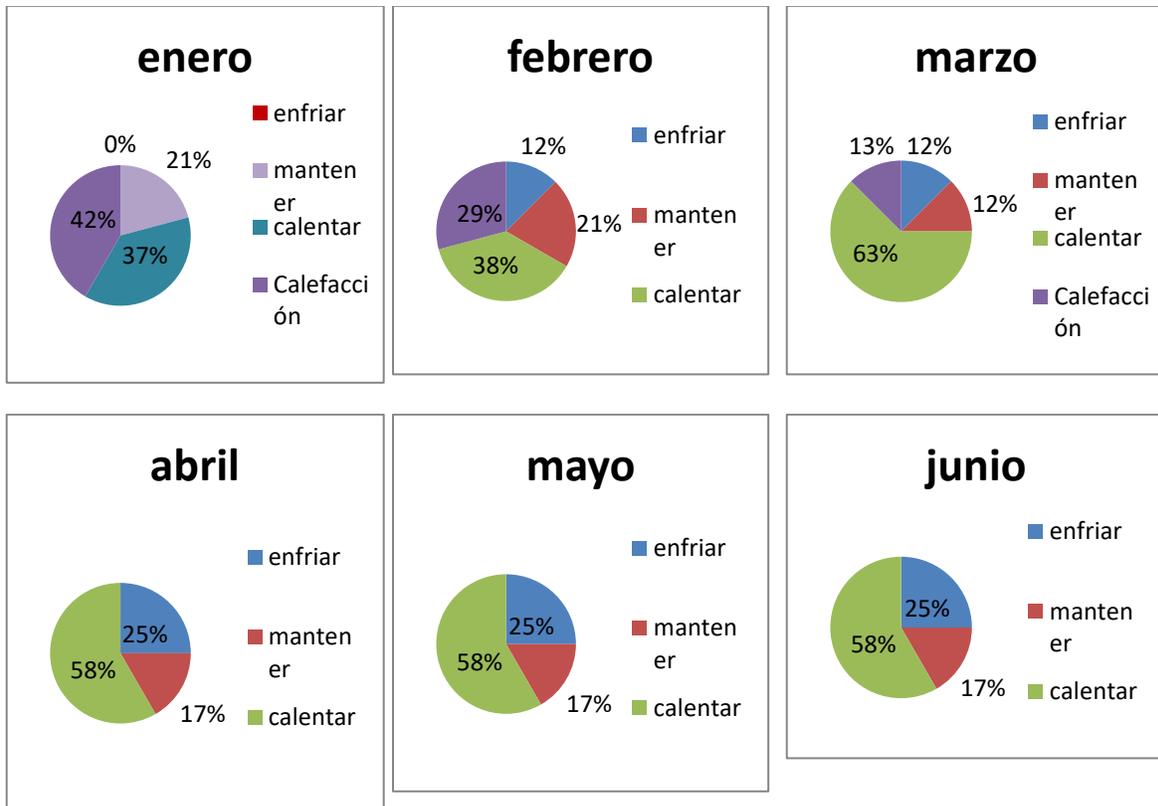


Gráfico. 67. Porcentaje de requerimiento anual



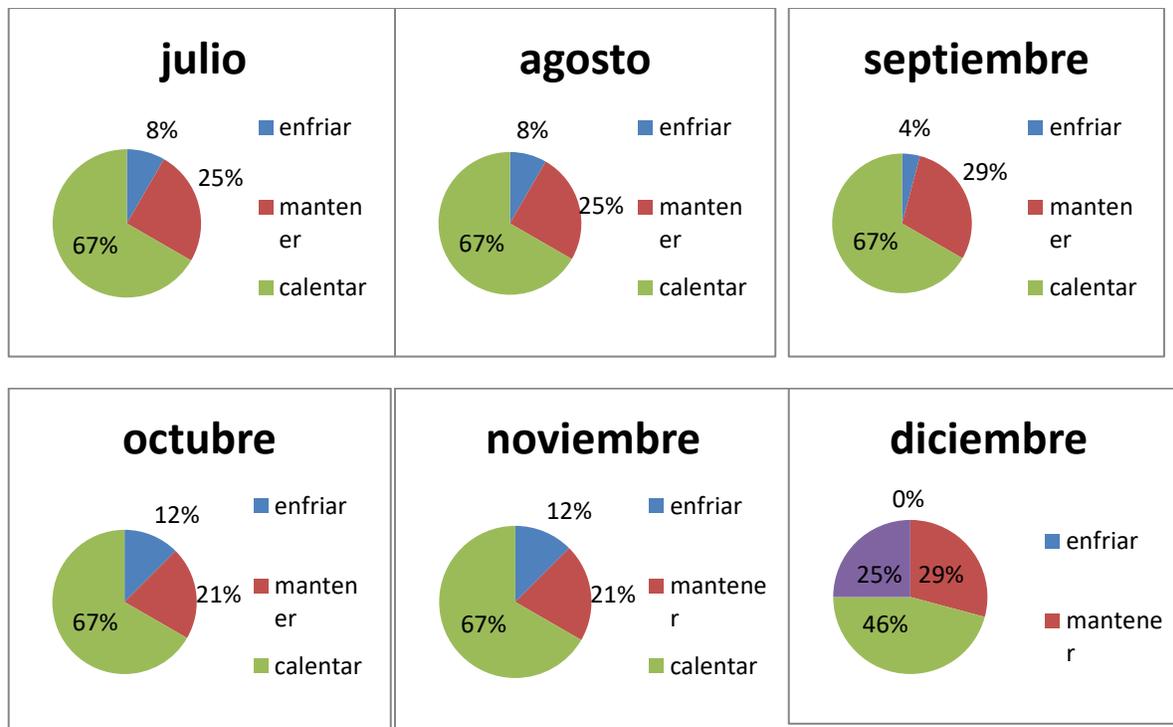


Gráfico. 68. Requerimientos de climatización por horas del mes.

En base a las anteriores gráficas es necesario implementar la calefacción solar, confort calefacción convencional, ventilación y enfriamiento (tabla. 104)

Tabla 108. Implementaciones de climatización.

	Horas anuales	%
Calefacción solar	166	58
Confort	61	21
Calefacción Convencional	26	9
Ventilación	22	7.6
Enfriamiento	13	4.5

Lo que podemos concluir en base a las gráficas anteriores es que es necesario la calefacción solar (58% de la horas anuales) que puede ser solucionado por medio de muros que absorban el calor durante el día y puedan irradiarlo por la noche, por lo que la **inercia térmica** de los materiales puede implementarse ya que es la capacidad de los materiales de absorber y acumular calor para ello es necesario que cada elemento del muro además de su ubicación sean ideales para este objetivo.

El confort térmico (21%) se da durante las tardes por lo es necesario mantenerlo, mientras que la ventilación (9%) puede ser aprovechado con los vientos dominantes que en su mayoría vienen del este.

Los muros orientados al oeste en la época de diciembre a marzo pueden absorber calor solar por **6 horas** para acumularlo para luego irradiarlo en la noche para un mayor confort.

## Conclusión del análisis de clima de Morelia

La radiación solar más intensa se da en la mayoría de los meses por 6 horas en los muros que se ubican al oeste, por lo que en estos muros es necesario analizar los tipos de materiales que se puedan utilizar, siendo igualmente el aprovechamiento de los vientos dominantes para el enfriamiento por ventilación.

Por lo que podemos concluir que es necesario probar los materiales con **seis horas de exposición al calor entre los 20 a 30 grados centígrados para obtener una prueba realista.**

## Referencias de anexos II

Bustamante Penilla, C., & García Espinosa, S. (2008). La vivienda moderna en Morelia, ¿una moda o respuesta al nuevo modo de vida? En C. Ettinger McNulty, & S. García Espinosa, *Michoacán: Arquitectura y Urbanismo* (págs. 251-258). Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

eadic. (s.f.). Arquitectura bioclimática. En *Cuadernos de formación*.

Ettinger, C. R. (2010). construcción y constructores. En C. R. Ettinger, *Modernidades Arquitectónicas Morelia, 1925-1960* (págs. 93-118). Morelia: DOCOMOMO México.

Semarnat. (s.f.). Obtenido de <https://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioManzanillo.pdf>

Servicio Meteorológico Nacional. (s.f.). Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=col>

Tavera Montiel, F. (1999). *La antigua Valladolid, hoy Morelia*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Weather Spark. (s.f.). Recuperado el Octubre de 2021, de <https://es.weatherspark.com/y/3601/Clima-promedio-en-Manzanillo-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

NOMBRE DEL TRABAJO

**Desarrollo y evaluación de morteros de cal, integrando arena volcánica y PET reciclado para construc**

AUTOR

**Elena Guadalupe Navarro Mendoza**

RECUENTO DE PALABRAS

**47037 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**261547 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**202 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**13.1MB**

FECHA DE ENTREGA

**Jul 5, 2024 10:45 AM GMT-6**

FECHA DEL INFORME

**Jul 5, 2024 10:50 AM GMT-6**

● **23% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 23% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 10% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

<b>Datos del manuscrito que se presenta a revisión</b>		
<b>Programa educativo</b>	Programa Interinstitucional de Doctorado en Arquitectura	
<b>Título del trabajo</b>	Desarrollo y evaluación de morteros de cal, integrando arena volcánica y PET reciclado para construcciones eficientes y sustentables	
	<b>Nombre</b>	<b>Correo electrónico</b>
<b>Autor/es</b>	M. en Arq. Elena Guadalupe Navarro Mendoza	0319470d@umich.mx
<b>Director</b>	Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán	elia.alonso@umich.mx
<b>Codirector</b>	Dr. Habid Becerra Santacruz	habid.becerra@umich.mx
<b>Coordinador del programa</b>	Dra. Eugenia María Azevedo Salomao	eugenia.azevedo@umich.mx

<b>Uso de Inteligencia Artificial</b>		
<b>Rubro</b>	<b>Uso (sí/no)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Asistencia en la redacción</b>	No	

# Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Si	Ortografía y puntuación.
Análisis de datos	No	
Búsqueda	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Elena Guadalupe Navarro Mendoza 
Lugar y fecha	4 de julio de 2024